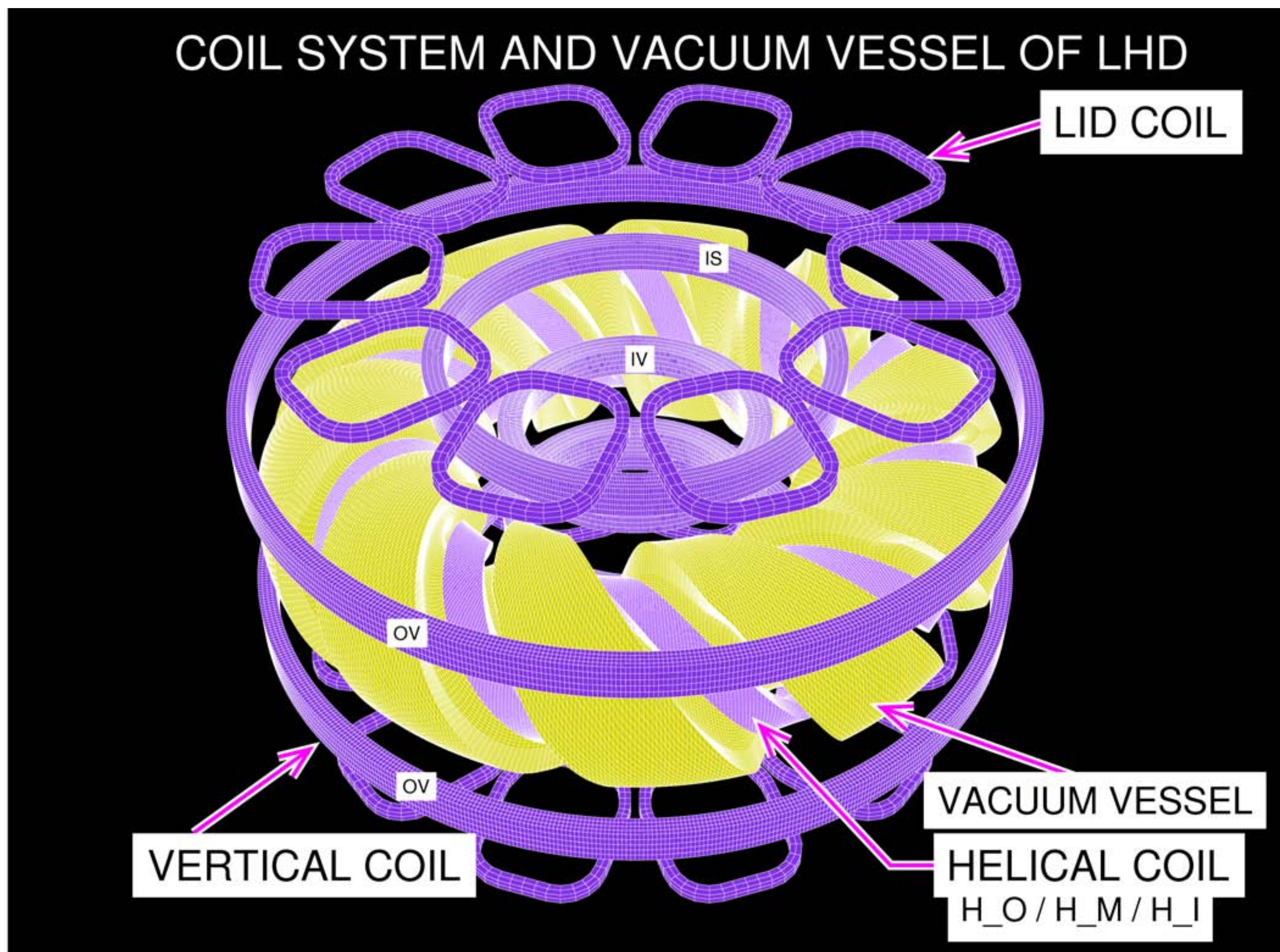
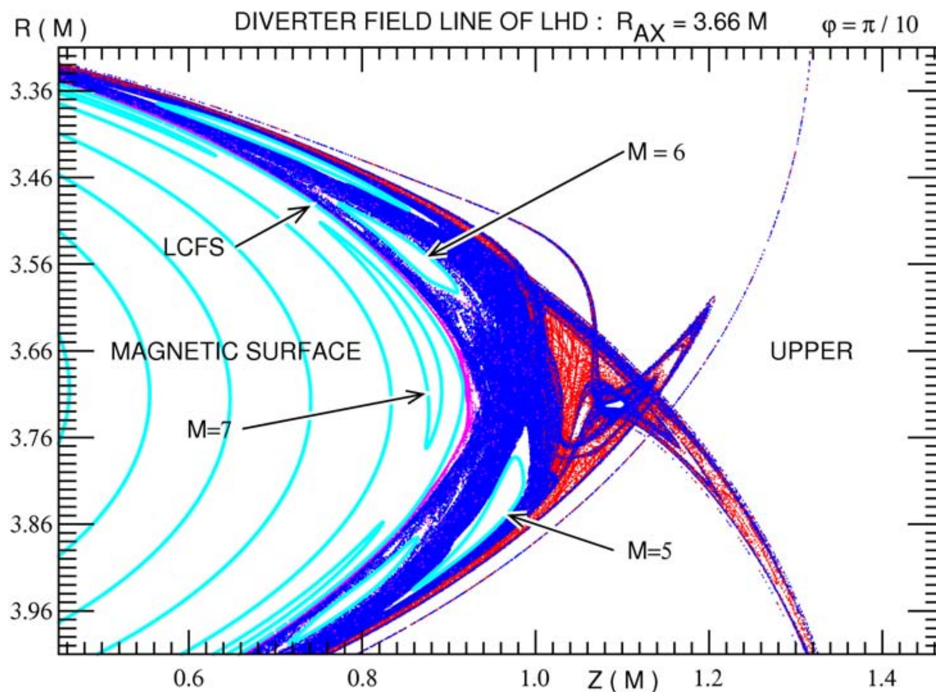
LHDの磁力線・磁気面可視化プログラム LHD_lines_of_force.exe の使い方 — Ver.XII

核融合科学研究所
渡辺二太, 吉田正信, 増崎 貴, 江本雅彦, 長山好夫



平成24 年3 月22 日

目 次



図の説明: LHD における磁気面, 最外殻磁気面 (LCFS), 磁気島, カオス磁力線, ダイバータレッグの詳細. 子午面 ($\phi = \pi/10$) における磁力線貫通図を示す. 磁気軸位置は $R_{\rm ax} = 3.66{\rm m}$ である. 磁気軸位置を $R_{\rm ax} = 3.7{\rm m}$ に設定すると, $m = 7$, $n = 1$ 磁気島は, カオス磁力線領域に移動し, $m = 5$, $n = 1$ の大きな磁気島は消滅する.(113 頁参照)

1 Ver.XII での改訂

大型ヘリカル装置 (LHD) の機器の増強

- 閉ダイバータ配位の部分的採用（79 頁, 図 24 参照）
- 新型 ICRF アンテナ (HAS アンテナ) の採用

および、LHD 実験の進展に対応するため、**LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム LHD__lines__of__force.exe** はプログラム内部構造を改訂した。ただし、ユーザーインターフェイスは **Ver.XI** 以前と基本的には同一である。

Ver.XII で盛り込まれた新しい機能は次の通りである。

- 磁気井戸が存在するときは、磁気井戸の深さと、磁気井戸存在領域を明示する（109 頁, 図 53 参照）
- 計測装置の視線に沿う磁場強度分布と、計測地点に対応する (磁力線で結ばれている) トムソン散乱計測地点とを明示する。データの二次利用のため、計算結果をテキストデータファイルにも出力する (42 頁, 4.9 任意断面磁力線貫通図参照)

LHD 装置は 3 組の垂直磁場コイルを備えている。この自由度 (コイルの電流値組み合わせ) を活用するため、磁気軸位置 $R_{\rm ax}$ と漏れ磁場強度と OV コイル (最外側配置垂直磁場コイル) 電流値を指定して磁場解析できるようにもなっている。これにより、磁気軸位置を指定したときの最適磁気面 (最外殻磁気面の体積最大、あるいは最外殻磁気面の回転変換最大、あるいは、カオス磁力線領域の厚み最小等の条件を満たす磁気面) が探索可能となっている (この機能は **Ver.XI** 以前でも利用可能であった) 。内寄配位 ($R_{\rm ax} \sim 3.6$m) は標準的配位 ($BQ \sim 100$) が最適に近いが、外寄せ配位では磁場配位最適化の余地は広い。

Ver.XI 以前は、磁場配位の高いヘリカル対称性を前提として、磁気面関数 Ψ を三角関数を含む多項式近似で表現していた。しかしながら、LID 磁場の印加、あるいは LHD とは異なる巻線則をもつヘリカルコイルが作る磁場の磁気面解析を可能とするため、磁力線追跡結果を用いて、トロイダル方向 ϕ は 640 等分、ポロイダル方向 χ は 200 等分した格子点上に磁気軸から磁気面までの距離 ρ を設定することにした。任意の (χ, ϕ) 地点の磁気面と磁気軸の距離 ρ はスプライン補間で計算させる。

2 序

大型ヘリカル装置 (LHD) 実験の進展に伴い, 加熱装置の増強, 放電時間の長時間化が実現している. LHD 真空容器内には, プラズマの加熱, 計測を目的とする各種構造物が組み込まれている. 真空容器内に新たな装置の設置を計画することもあるであろう. これらの構造物が, 磁気面, ダイバータ磁力線, あるいは高エネルギー粒子軌道と干渉すると, プラズマ閉じ込め性能の劣化, あるいは, 思いがけない, 装置の損傷等が引き起こされる.

LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「 LHD_lines_of_force.exe」の第一の目的は, LHD の真空容器および真空容器内各種構造物と磁気面あるいはダイバータ磁力線との干渉を解析することである．第二の目的は, プラズマ計測装置から見える, 磁力線・磁気面構造を示すことである．計測データの解析に役立つことを期待する．本プログラムでは, ローカル・アイランド・ダイバータ (LID) 磁場が生成する磁気島構造も可視化することができる．

LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「 LHD_lines_of_force.exe」の特徴は, 真空容器内に設置予定の任意の構造物を磁力線解析に取り入れることができる点にある．

最近のパソコンの性能向上 (ギガバイトを超える主記憶の実現, 64 ビット対応 Fortran コンパイラーの実装, それを支える cpu の高速化 等) により, LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「 LHD_lines_of_force.exe」は, 取扱説明書を作成すれば, 多数の研究者の実用に耐えると期待して, 当冊子を用意した.

LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「 LHD_lines_of_force.exe」で, 目的とする情報を得るには, 多数のパラメータを入力データして用意する必要がある．そのため, GUI (Graphical User Interface) 環境下で入力データを用意できるようにした. 敷居があるかもしれないが, 数回使えば, 目的とする計算は直ちに行えるようになるであろう．現在の計算機ででも代表的計算時間は約 10 分程度である.

計算結果の出力はポストスクリプトファイル (ps file) で行っている．ASCII テキストファイルなので, 必要に応じた清書 (線の太さ, 点の大きさ, 文字サイズ, 色指定等の変更, 不要部分の削除, 必要部分の追加, あるいは拡大, 縮小, 回転, 図の合成 等) は任意に行える．ただし, ポストスクリプトファイルのサイズは一般的に巨大となるので, ps file を png ファイルに変換する GUI も用意した.

> png (Portable Network Graphics) ファイル:
> 高い圧縮率と本格的な画像編集に耐える高度の表現力を兼ね備えている，フリーの画像フォーマット．Windows で標準的にサポートされている．TEX に張り込むこともできる.

100MB を超えるポストスクリプトファイルも png ファイルに変換すれば 100kB オーダーのサイズとなり, 遙かに, 扱いやすくなる. 見た目の仕上がりはポストスクリプトファイルのものとは変わらない (分解能は任意に設定できる).

LHD の磁力線解析結果を別のプラズマ挙動解析プログラム，あるいは，CAD システムの入力データに利用したいとする要求もある． そのためのデータを ASCII テキストファイルに出力することは LHD の磁力線・磁気面可視化プログラムのソースファイル「 LHD_lines_of_force.f90」に手を加えれば対応できる.

第 2 節には, LHD の磁力線･磁気面可視化プログラム「 LHD_lines_of_force.exe」の起動法を述べる. 第 3 節には LHD の磁力線･磁気面可視化プログラム「 LHD_lines_of_force.exe」に対する入力データの詳細を記述する. LHD の磁力線･磁気面を「 LHD_lines_of_force.exe」で計算した例は第 4 節に示す. これまでに気がついた使用上の注意点とその他の覚え書きについては第 5 節にとりまとめた.

LHD の磁力線･磁気面可視化プログラム「 LHD_lines_of_force.exe」の使い方—Ver.III は,NIFS-TEC-14(2006/09/13)[4] として印刷されたものの改訂版である. 改訂の要点は LID 磁場を取り入れて LHD の磁場構造を解析できるようにした点である．Ver.II において LID 磁場の組み込みを可能としたが, この Ver.III においては LID ヘッドに対応する磁力線貫通図も作成できるようにした．さらに, LHD の MHD 安定性の観点から, 真空容器壁の正確な位置を知る必要もあったので, そのデータも図示した (図 4.10.1)．また, 初版および Ver.II においては, 「真空容器壁, ダイバータタイルの走査」(47 頁) 画像が鏡映像となっていた．この誤りを修正した.

「 LHD_lines_of_force.exe — Ver.IX」では磁力線追跡結果の三次元 CAD システムへの取り込みを可能とした. 三次元 CAD システムでは、視点あるいは物体を任意に動かせる. この機能を利用することで、LHD 磁場の 3 次元構造を視覚的に理解できる．さらに、真空容器内に測定装置を組み込むとき、装置の CAD データを用意すれば、磁力線との干渉を直ちに確認することもできる．そのために、磁力線追跡結果を dxf ファイルにも出力できるようにした.

DXF (Drawing Interchange File) は、CAD ソフトウェアで作成した図面のファイルフォーマットで、CAD 図面の情報交換における「事実上の標準」的な存在である．二次元および三次元の図形をベクトルデータとして格納する.

出典:フリー百科事典「ウィキペディア（Wikipedia）」

真空容器、ICRF アンテナ、ダイバータタイル、NBI1 号機、NBI2 号機、NBI3 号機のアーマタイルの dxf ファイルも用意した.

磁力線追跡結果と粒子軌道追跡結果の DXF ファイルが必要に応じて作成できるので、3 次元 cad システムの上でそれらを同時に表示すれば LHD での粒子軌道特性も一層わかりやすくなる.

dxf ファイルを処理できる 3Dcad システムとしては「Google SketchUp 6(無料日本語版)」がリリースされている．また、Adobe Acrobat 3D Version 8 がインストールされていれば、Adobe Reader 8 以上で閲覧可能な pdf フィルに変換することもできる.

dxf ファイルのデータ構造は極めて冗長である. 磁力線あるいは粒子軌道のような連続データを表現する dxf ファイルは巨大となる. そのため、磁力線、粒子軌道の一部部分 (例えば、真空容器内の構造物への衝突直前から衝突時までの軌道) のみを dxf ファイルに出力できるようにも工夫した.

また、この改訂を機に、新たな機能も追加した.

- カオス磁力線領域の磁力線貫通図を拡大図で表示できるようにした.
- 最外殻磁気面 (推定) の回転変換と最外殻磁気面の位置 (座標値) を回転変換分布図に記入する.

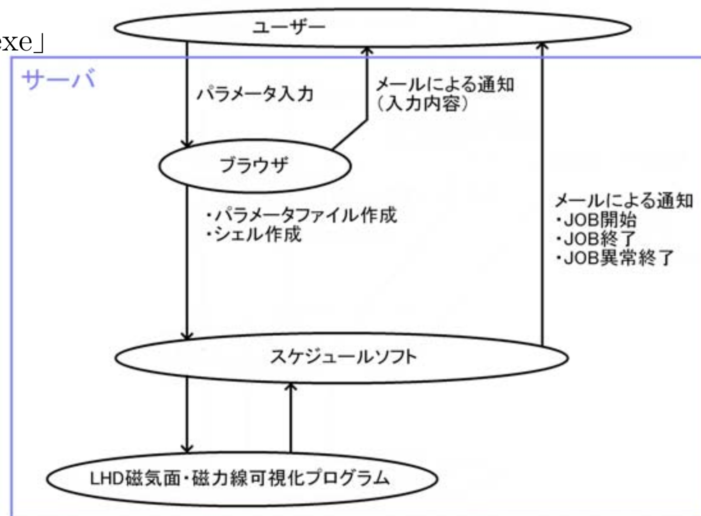
- 磁場配位の可能性を広げるため、垂直磁場コイル電流値の新しい設定法を取り入れた.

「 LHD_lines_of_force.exe — Ver.X」では閉ダイバータに対応した. また、磁気軸位置、漏れ磁場強度を指定した垂直磁場制御による磁気面最適化の解析ができるようにもした.

改訂に当たっては完全な上位互換の実現を目指した.

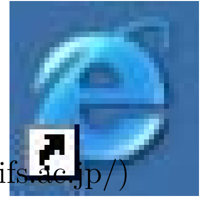
3　「LHD_lines_of_force.exe」 の起動法

LHD 磁気面・磁力線可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」の実行は以下のように行なわれる (右図参照).



- ブラウザを立ち上げる.
- ブラウザでパラメータを設定する.
- パラメータの設定を済ませると, スケジュールソフトによる JOB 投入画面となる.
- スケジュールソフトがLHD 磁気面・磁力線可視化プログラム「 LHD_lines_of_force.exe」を実行する. スケジュールソフトは, 計算の開始や終了, または異常終了をユーザ指定のメールアドレスに通知する.

3.1 ブラウザの立ち上げ方





ディスクトップ上にあるブラウザのアイコン (例:右図) をダブルクリックするか, スタートメニューからブラウザを選択し起動する.

次に核融合科学研究所大型ヘリカル装置計画のホームページ (http://www.lhd.nifs.ac.jp/) にアクセスする． そこでこのホームページから，解析情報グループへのリンクをクリックすることで解析情報グループのホームページ (http://kaiseki-proxy.lhd.nifs.ac.jp//) に入ることができる．

解析情報グループのホームページ内にある，LHD の磁力線・磁気面可視化プログラムへのリンク (http://kaiseki-proxy.lhd.nifs.ac.jp/~batch/linesofforce/) をクリックする．すると，LHD の磁力線･磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」に対する入力データ画面となる． (2012/1/27 現在)

3.2 ブラウザを利用するパラメータ設定

LHD の磁力線･磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」はファイル fort.50 から磁力線解析に必要なデータを読み込む．このデータをブラウザで設定することができる．データを設定するブラウザの画面を図 1 に示す (英語化版も用意した).

- 通知先
  - メールアドレス:
    スケジュールソフトによる通知に使用する.
  - JOB 名 :
    スケジュールソフトによる通知に使用する.**(先頭は英字であること．空白は不可．)**.

— JOB 開始のメール例 —
PBS Job Id: 166.kaiseki-dev.nifs.ac.jp
Job Name: sample
Begun execution
— JOB 終了のメール例 —
PBS Job Id: 166.kaiseki-dev.nifs.ac.jp
Job Name: sample
Execution terminated
Exit_status=0
resources_used.cput=00:07:15
resources_used.mem=270072kb
resources_used.vmem=15240640kb
resources_used.walltime=00:07:19
— JOB 異常終了のメール例 —

jobset reset Japanese English

通知先
メールアドレス foo@lhd.nifs.ac.jp JOB名 sample

計算方法
◉ 閉ダイバータ対応 ○ 開ダイバータ対応

CAD出力の設定
☑ CAD出力
○ 先頭から出力 ◉ 最終地点から出力 ☐ 容器, 構造物衝突磁力線のみ描画
総ステップ数 200 描画間引き間隔 3
CAD Data 描画範囲 : 先頭トロイダル角 72 (度) 最終トロイダル角 108 (度)
描画方法 : ◉ 磁力線を線で出力 [線の太さ 7 (mm)] ○ 磁気面を面で出力

コイル電流値の設定
Rax, Bq, gamma 3.6, 100, 1.2538 Bax 2.75 CAL ☑ 磁気軸位置を指定する場合 Rax_0 3.6 (m) ☑ 漏れ磁場強度 0.7 (Gauss)
ヘリカルコイル H_O(A) 11000 H_M(A) 11000 H_I(A) 11000 垂直コイル OV(A) -17967 IS(A) -3007 IV(A) 11229
☐ LIDコイル ターン数 48 A系統(A) 0 SET B1系統(A) 0 SET B2系統(A) 0 SET

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

☐ LID head scan トロイダル角 0 最深部 r座標 0 (m) 最浅部 r座標 0 (m) 分割数 0 画面横幅 0 (m)

Limiter Dataの設定
☑ DIVERTER ☐ NBI Armor Tiles
☑ ICRF Antenna 3.5UL振り角度 0 (度) 4.5UL後退量 0.07 (m) 7.5UL後退量 0.07 (m)
追加リミターなし Limiter Data File 参照... 移動距離(x,y,z) = (0, 0, 0)(m)

出発地点
最大トーラス周回数 200 + −
☑ 回転変換・比体積分布 分割数 50 ポート番号 1
追跡方向 ○ -B方向 ◉ 両方向 ○ B方向
出発点記述座標系 ○ 回転ヘリカル座標系 ○ 円柱座標系 ○ 直交座標系 ◉ カオス磁力線と磁気面
☐ カオス磁力面領域の磁気島のみプロット
50 5 7 10 参考

計算条件＆出力条件
描画最短磁力線結合長(トーラス周回数) 0.75 + −
子午面断面磁力線貫通図 先頭トロイダル角 18 (度) 最終トロイダル角 54 (度) 分割数 36 18, 54, 36 ☑ ヘリカル対称性 ☐ 拡大図表示
等高線の記入方法 種別 |B| ΔB 0.1 B0 2.75
☑ 任意断面磁力線貫通図
◉ ほぼ垂直な平面(Oポートから)
○ ほぼ垂直な平面(接線ポートから)
○ ほぼ水平な平面
○ 計測装置上の2点
○ 視野内の2点
視点座標(x) 7.0772 視点座標(y) 1.3691 視点座標(z) 0.4749
視野中心座標(x) 2.6740 視野中心座標(y) 1.9339 視野中心座標(z) -1.3955
- - -
視野最大幅 3.2 (m) 参考
立体図とカメラの構え方
○ 立体図を作成しない
○ 真空容器壁面の走査
○ 腹這いでカメラを構える
◉ 立ってカメラを構える
○ 真空容器の部分切断
視点座標(x) 7.0772 視点座標(y) 1.3691 視点座標(z) 0.4749
視野中心座標(x) 2.674 視野中心座標(y) 1.9339 視野中心座標(z) -1.3955
視点～スクリーン間の距離 2.3 (m) 視野最大角 10 (度) 参考
☐ 断面を表示する 磁力線ドットサイズ: ○ 極大 ○ 大 ○ 中 ◉ 小 ○ より小 ○ 極小
立体図に表示する構造物と磁力線 ☑ 真空容器 ☑ リミター ☐ ヘリカルコイル ☐ ヘリカルコイル容器
☐ 垂直磁場コイル ☐ 磁気島コイル ☑ 磁力線
磁力線追跡停止の条件 ☑ リミター ☑ 真空容器
コメント sample
☑ PNG 出力 300 (DPI)

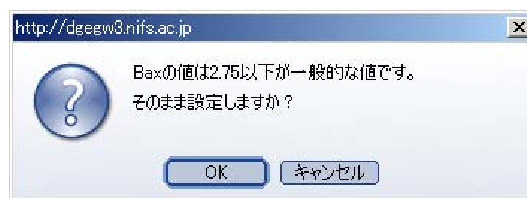
図 1: パラメータを設定するブラウザの画面

PBS Job Id: 166.kaiseki-dev.nifs.ac.jp
Job Name: sample
An error has occurred processing your job, see below.
Post job file processing error; job 166.kaiseki-dev.nifs.ac.jp on host
egcalc1.lhd.nifs.ac.jp/0

- 計算方法, 計算結果格納ファイル名の指定（入力データ詳細: 20 頁第 1 データ参照）
  - 閉ダイバータ対応：
    閉ダイバータ対応計算をする場合に選択する.
  - 開ダイバータ対応：
    開ダイバータ対応計算をする場合に選択する.
  - 計算結果を格納するファイル:
    新規計算の場合は下記のファイル群が作成される. このときの接頭辞は自動的に PBSxxxxxx ('xxxxxx' 部分は JOB ごとにシステムがランダムに生成) となる.
    計算結果の格納 (バイナリファイル) $\Longrightarrow$ PBSxxxxxx.40.
    画像ファイル (ポストスクリプトファイル) $\Longrightarrow$ PBSxxxxxx.ps、
    画像ファイル (png ファイル) $\Longrightarrow$ PBSxxxxxx_nnn.png、 ("nnn"は ps ファイルの頁番号)
    cad ファイル (dxf ファイル) $\Longrightarrow$ PBSxxxxxx.dxf
    磁場分布、回転変換分布 (txt ファイル) $\Longrightarrow$ PBSxxxxxx_bf.txt
    計測装置視線と Thmson 散乱計測地点の対応表示データ (txt ファイル) $\Longrightarrow$ PBSxxxxxx.THMSN.txt
  - cad 出力:
    磁力線追跡計算結果を cad システム用データに出力するときに選択する.
    cad データの出力法は下記に従う.
    * 先頭から出力:
      磁力線追跡結果を計算した順に出力するとき選択する.
    * 最終地点から出力:
      磁力線追跡結果を計算とは逆順に出力するとき選択する.
    * 衝突磁力線のみ描画:
      真空容器、あるいは真空容器内構造物に衝突した磁力線のみを出力するとき選択する. このときは磁気面を形成している磁力線は描画されない.
    * 描画総ステップ数:
      描画する磁力線の最大総ステップ数を指定する. 磁力線追跡は、ほぼ 640 ステップでトーラスを 1 周する.
    * 描画間引き間隔:
      描画するデータの間引き間隔を指定する. 例えば 8 と指定したときはトーラスを一周する磁力線はほぼ 80 (= 640/8) 本の線分で描画される.

* 線の太さ:
  磁力線は、磁場方向に先端を向けた 3 角錐の連鎖で描画される. この 3 角錐の底辺の幅を mm 単位で指定する.

- コイル電流値の設定（入力データ詳細: 22 頁参照）
  - Rax, Bq, gamma
    標準的コイル電流値が一覧表となっている．この一覧表から, コイル電流値を検索するのに使用する.
  - Bax
    一覧表となっている標準的コイル電流値は, $B_{\rm ax} = 3$T 換算の数値である．実際のコイル電流値を設定するには, 磁気軸上磁場強度 $B_{\rm ax}$ の値をここに指定しなければならない.
  - CAL ボタン
    選択された Rax, Bq, gamma と入力された Bax をもとにコイル電流の参考値を設定する．LHD として, 現在は許可されていない Bax の場合は, 以下の警告メッセージを表示する.



    OK が押された場合は，その値でコイル電流の参考値を設定する.
    キャンセルが押された場合は，Bax 値を, 選択されている Rax, Bq, gamma が許容する値に再設定する.
  - H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV
    上記で電流値を設定した場合はここにコイル電流値が出力される．直接コイル電流値をここに設定することもできる．磁力線追跡計算はここに示されたコイル電流値を用いて行う.
    単位は A
  - 磁気軸位置を指定しない場合は, 下記は無視され, 指定コイル電流値で磁場計算する.
  - 磁気軸位置を指定:
    磁気軸位置を指定し, IS コイル電流値を計算させる場合に選択する.
    OV, IV コイル電流値は前記で指定した値を使う．プログラムの中では, 磁気軸位置 $R_{\rm ax}$(トロイダル平均値) が指定した値となるようにニュートン法で IS コイル電流値を求める (ニュートン法の初期推定値には前記で指定した IS 電流値を利用する). これにより, 磁気軸位置、γ、IV コイル電流値指定による垂直磁場コイル電流値設定法の枠を超えた磁場配位を解析可能とする.

- 漏れ磁場強度を指定:
  磁気軸位置と共に漏れ磁場強度を指定し、垂直磁場制御による磁気面最適化の解析を行う場合に指定する.
  標準値は 0 または, ±10(ガウス) 程度以下である。 10×10^4 ガウスを超える漏れ磁場強度は指定できない.

- LID コイル電流値の設定（入力データ詳細: 24 頁参照）
  - LID 磁場 on/off チェックボックス
    チェック時，LID コイル電流値は入力値が設定される.
    未チェック時，LID コイル電流値はすべて 0 が設定される.
  - ターン数
    LID 磁場を求めるためのターン数を指定する.
    LID コイルのターン数は 48 である．ターン数を 48 と設定すれば，下記の電流値は実電流値となる.
  - A 系統 (A)
    A 電源系統の電流値を設定する.
    単位は A
    SET ボタンを押すと，A 電源系統に対応する LID コイルの電流値 (アンペアターン数) をまとめて設定することができる.
  - B1 系統 (A)
    B1 電源系統の電流値を設定する.
    単位は A
    SET ボタンを押すと，B1 電源系統に対応する LID コイルの電流値 (アンペアターン数) をまとめて設定することができる.
  - B2 系統 (A)
    B2 電源系統の電流値を設定する.
    単位は A
    SET ボタンを押すと，B2 電源系統に対応する LID コイルの電流値 (アンペアターン数) をまとめて設定することができる.

- LID ヘッドに対応する磁力線貫通図の設定（入力データ詳細: 24 頁参照）.
  - LID ヘッド on/off チェックボックス
    チェック時，LID ヘッドを引き抜く操作に対応できる磁力線貫通図を複数枚作成する.
    未チェック時，LID ヘッドに対応する磁力線貫通図は作成しない.
  - トロイダル角 (度)
    LID ヘッドを挿入するトロイダル角を指定する. LID ヘッドは 6O ポートに用意されているので通常は 180(度) である.

- 最深部 r 座標 (m)
- 最浅部 r 座標 (m)
- 分割数
- 図面の横幅 (m)

- Limiter Data の設定（入力データ詳細: 28 頁第 3 データ参照）
  - DIVERTER:
    チェック時，既設のヘリカルダイバータタイルの存在を磁力線追跡計算に反映させる．
    未チェック時，ダイバータタイルの存在は無視する．
  - NBI アーマタイル:
    NBI (NBI 1 号機、NBI 2 号機、NBI 3 号機) アーマタイルを組み込むとき選択する．
  - ICRF Antenna:
    チェック時，ICRF アンテナの存在を磁力線追跡計算に反映させる．
    未チェック時，ICRF アンテナは無視する．
  - 3.5UL 振り角度:
    LHD の ICRF アンテナは可動である．3.5UL アンテナ (HAS アンテナ) の振り角度を入力する．
    単位は 度
  - 4.5UL 後退量:
    LHD の ICRF アンテナは可動である．4.5UL アンテナの後退量を入力する．
    単位は m
  - 7.5UL 後退量:
    LHD の ICRF アンテナは可動である．7.5UL アンテナの後退量を入力する．
    単位は m
  - 追加構造物の設置:
    真空容器内に新規構造物を設置するかどうかを選択する．
    追加を選択した場合，新規構造物の構造を記述した csv ファイルを指定する必要がある．このファイルは，サーバにコピーされ、別名 (指定ファイル名の頭にシステムが自動的に設定した文字列 'xxxxxx' を付加) で利用する．
    LID ヘッドの追加を選択した場合は真空容器内に LID ヘッドが設置される．尚，LID ヘッドの構造を記述した csv ファイルを指定する必要はない．
  - 移動距離 (x, y, z):
    追加した構造物を真空容器内で平行移動させる場合には、移動量を指定する．

- 出発地点（入力データ詳細: 31 頁第 4 データ ～ 35 頁第 6 データ参照）

- 最大トーラス周回数:
  磁力線を追跡する最大のトーラス周回数を入力する (実数で小数点以下でも指定できる).
  標準値は 20 程度. これに対応する磁力線結合長は $L_{cnl} = 20\times2\pi\times3.9 \simeq 490.1\,\mathrm{m}$ である. ただし, 磁気面を確認するための磁力線追跡は, プログラム内部で, 最大トーラス周回数を 200 (LID 磁場印加時は 500) と設定している.
- 回転変換・比体積分布:
  視線方向としてポート番号 (1 ∼ 10) を指定し，分割点数も設定する.
  最外殻磁気面と磁気軸間を指定した分割数で分点を設定し各分点上の回転変換・比体積分布を計算する。標準的分割点数は 50 程度.
- 追跡方向:
  磁力線を追跡する方向を選択する.
- 記述座標系:
  磁力線追跡出発地点を記述する座標系を選択する.
- カオス磁力線領域内の磁気島のみプロット:
  チェック時，カオス磁力線領域内の磁気島のみプロットする (例外的計算).
  未チェック時，カオス磁力線領域内の磁気島はプロットしない (通常的計算).
- 磁気面データ格納ファイル名
  磁気軸, 磁気面を近似する関数の係数を格納するファイルの名称で，システムが自動的に設定する (PBSxxxxxx.dat, 'xxxxxx' 部分は JOB ごとにランダムに生成したもの).

• 計算条件＆出力条件（入力データ詳細: 第 7 ∼ 14 データ参照）

- 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数）: (39 頁第 7 データ参照)
  描画する最短の磁力線結合長を指定する.
  標準値は 0.75 程度. これに対応する磁力線結合長は $L_{cnl} = 0.75 \times 2\pi \times 3.9 \simeq 18.38\,\mathrm{m}$ である.
- 子午面断面磁力線貫通図: (39 頁第 8 データ参照)
  子午面断面磁力線貫通図を描画するのに必要なパラメータを入力する.
  SELECT コントロールから選択することもできる.
- ヘリカル対称性: (39 頁第 8 データ参照)
  チェック時，ヘリカル対称性の成立を仮定して描画する.
  未チェック時，計算結果をそのまま描画する.
- 拡大図:
  子午面断面貫通図を拡大表示するときに指定する.
  横長断面での最外殻磁気面からダイバータレッグの根本部分、縦長断面での内壁近辺を拡大して磁力線貫通図を示す.

- 等高線 (磁力線貫通図に書き込む磁場強度等高線) の記入法: 41 頁第 9 データ参照)
  未チェック時: 磁場強度の等高線は書き込まない.
  チェック時: 磁力線貫通図に書き込む磁場強度の等高線図の形式を指定する.
  - 種別　:　磁力線貫通図に強度が書き込まれる磁場成分を選択する.
  - Δ B　:　磁場強度の間隔を入力する. 単位は T.
  - B0　:　基準磁場強度を入力する. 単位は T.
- 任意断面磁力線貫通図: (42 頁第 10 データ参照)
  未チェック時，任意断面磁力線貫通図は作成しない.
  チェック時，任意断面磁力線貫通図を作成し、計測装置視線上の磁場強度分布、回転変換分布、比体積分布を出力する。更に、計測装置視線上の地点とトムソン散乱計測装置による計測地点との対応を示すデータも出力する。
  任意断面は計測装置の視点と、ピボット点と計測装置回転角度とで指定する。
  磁力線貫通図を描画するのに必要なパラメータを入力する.
  参考ボタンを押すと参考値が設定される.
- 立体図とカメラの構え方: (46 頁第 11 データ参照)
  立体図の, 作成・非作成の指示と, 立体図を作成するときのカメラの構え方を指定する.
  参考ボタンを押すと参考値が設定される.
- 立体図に表示する構造物と磁力線: (54 頁第 12 データ参照)
  チェックされている構造物，磁力線を描画する.
- 磁力線追跡停止の条件: (55 頁第 13 データ参照)
  チェックされていると，リミター, あるいは, 真空容器で磁力線は停止する.
  未チェック時，磁力線はリミター, あるいは, 真空容器を貫通する.
- コメント: (56 頁第 14 データ参照)
  図に書き込むコメントを入力する.
- PNG 出力:
  チェック時，出力した PS ファイルを画像ファイル (png ファイル: 参照 5 頁) に変換･出力する JOB を起動する. 解像度 (DPI) を指定する. 標準値は 300. png ファイルは ps ファイルのページ番号順に名前を付ける. (PBSxxxxxx_nn.png). ’xxxxxx’ の部分は JOB ごとにランダムに生成した接頭辞.

JOBset ボタンを押すと JOB の投入が行なわれる.

jobset　reset
通知先
メールアドレス　foo@LHD.nifs.ac.jp　JOB

設定内容がブラウザに表示 (右図) されるとともに, メールとしても送られてくる. **処理結果 (画像ファイル，計算結果格納ファイル，PNG ファイル) については，¥¥egcalc1¥work**

または ¥¥egcalc2¥work に出力されている.

(2012/2/13 現在)

— **メール例** —
【LHD line of force parameters】

≪JOB 名≫
　SAMPLE

≪計算結果出力方法≫
　ダイバーター種別　　：CLOSED DIVERTOR
　計算方法　　：新規
　画像ファイル名　　：
ftp://eghome.lhd.nifs.ac.jp/work/PBS5cR9NY.ps
　計算結果格納ファイル名　　：
ftp://eghome.lhd.nifs.ac.jp/work/PBS5cR9NY.40
　最外殻磁気面磁力線軌道データファイル名：
ftp://eghome.lhd.nifs.ac.jp/work/PBS5cR9NY_lcfs.41
　CAD ファイル名　　：
ftp://eghome.lhd.nifs.ac.jp/work/PBS5cR9NY.dxf

≪CAD 出力≫
　最終地点から出力
　全粒子出力
　総ステップ数　　　：200
　描画間引き間隔　　：3
　先頭トロイダル角 (度)：72
　最終トロイダル角 (度)：108
　磁力線を線で出力
　線の太さ (mm)　　：7

≪コイル電流値≫
　H_O　：11000
　H_M　：11000
　H_I　：11000
　OV　：−17967
　IS　：−3007
　IV　：11229
　Rax　：3.6
　Bax　：2.75
　gamma　：1.2538
　Rax 0　：3.6
　leak BT：0.7

≪LID コイル電流値≫
　LID Coil turn　：0
　LID Coil upper(AT)：
　　1 = 0
　　2 = 0
　　3 = 0
　　4 = 0
　　5 = 0
　　6 = 0
　　7 = 0
　　8 = 0

下記内容でジョブを 登録しました

通知先	foo@lhd.nifs.ac.jp	
計算結果出力方法	ダイバーター種別	CLOSED DIVERTOR
	計算方法	新規計算
	画像ファイル名	/work/PBS5cR9NY.ps
	計算結果格納ファイル名	/work/PBS5cR9NY.40
	最外殻磁気面磁力線軌道データファイル名	/work/PBS5cR9NY_lcfs.41
	CADファイル名	/work/PBS5cR9NY.dxf
CAD出力	最終地点から出力	
	全粒子出力	
	総ステップ数	200
	描画間引き間隔	3
	先頭トロイダル角(度)	72
	最終トロイダル角(度)	108
	磁力線を線で出力	
	線の太さ(mm)	7

コイル電流値

H_O	H_M	H_I	OV	IS	IV	Rax	Bax	gamma	Rax 0	leak BT
11000	11000	11000	−17967	−3007	11229	3.6	2.75	1.254	3.6	0.7

LIDコイル電流値

ターン数	48									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
u	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

LID head scan

トロイダル角	最深部(r)(m)	最浅部(r)(m)	分割数	画面横幅(m)
0	0	0	0	0

リミターデータ	DIVERTOR	あり
	NBI Amor Tiles	なし
	ICRF アンテナ	あり
	3.5UL振り角度(度)	0
	4.5UL後退量(m)	0.07
	7.5UL後退量(m)	0.07
出発地点	最大トーラス周回数	200
	回転変換・比体積分布(ポート番号)	1
	分割数	50
	追跡方向	両方向
	出発点記述座標系	カオス磁力線と磁気面
	出発地点細分割データと磁気面枚数	50, 5, 7, 10
	磁気軸・磁気面データ取得	あり
	磁気軸・磁気面データファイル名	/work/PBS5cR9NY.dat
計算条件	描画最短磁力線結合長	0.75
子午面断面磁力線貫通図	初期値(180*φ/π)	18
	最大値(180*φ/π)	54
	分割数(n)	36
	ヘリカル対称性	あり
	拡大図表示	なし
等高線の記入方法	種別	|B|
	ΔB(T)	0.1
	B0 (T)	2.75
任意断面磁力線貫通図	ほぼ垂直な平面(Oポートから)	
	視点座標(x, y, z)(m)	7.0772, 1.3691, 0.4749
	視野中心座標(x, y, z)(m)	2.6740, 1.9339, −1.3955
	視野最大幅(m)	3.2
立体図とカメラの構え方	カメラの構え方	立ってカメラを構える
	視点座標(x, y, z)(m)	7.0772, 1.3691, 0.4749
	視野中心座標(x, y, z)(m)	2.674, 1.9339, −1.3955
	視点〜スクリーン間の距離(m)	2.3
	視野最大角(度)	10
	断面表示	なし
	磁力線ドットサイズ	小(0.07mm)
構造物表示	真空容器	表示
	リミター	表示
	ヘリカルコイル	非表示
	ヘリカルコイル容器	非表示
	垂直磁場コイル	非表示
	磁気島コイル	非表示
	磁力線	表示
磁力線追跡	リミター	追跡停止
	真空容器	追跡停止
コメント	sample	
PNG 出力	解像度	300 (dpi)

9 = 0
10 = 0
LID Coil lower(AT)：
1 = 0
2 = 0
3 = 0
4 = 0
5 = 0
6 = 0
7 = 0
8 = 0
9 = 0
10 = 0

≪LID head scan≫
トロイダル角：0
最深部 (r)(m)：0
最浅部 (r)(m)：0
分割数　　　：0
画面横幅 (m)：0

≪ リミターデータ ≫
DIVERTER　：あり
NBI Armor Tiles　：なし
ICRF アンテナ　：あり
3.5UL 振り角度 (度)　：0
4.5UL 後退量 (m)　：0.07
7.5UL 後退量 (m)　：0.07

≪ 出発地点 ≫
最大トーラス周回数　：20
回転変換・比体積分布 (ポート番号, 分割数)：1, 50
追跡方向　：両方向
座標系　：カオス磁力線と磁気面
出発地点細分割データと磁気面枚数　：50, 5, 7, 10
磁気軸・磁気面データ取得　：あり
磁気軸・磁気面データファイル名　：ftp://eghome.lhd.nifs.ac.jp/work/PBS5cR9NY.dat

≪ 計算条件 ≫
描画最短磁力線結合長：0.75

≪ 子午面断面磁力線貫通図 ≫
初期値 ($\phi * 180/\pi$)：18
最大値 ($\phi * 180/\pi$)：54
分割数 (n)　：36
ヘリカル対称性　：あり
拡大図表示　：なし

≪ 等高線 ≫
種別　：$|\boldsymbol{B}|$
Δ B(T)：0.1
B0 (T)：2.75

≪ 任意断面磁力線貫通図 ≫
ほぼ垂直な平面 (O ポートから)
視点座標 (x, y, z) (m)　：7.0772, 1.3691, 0.4749
視野中心座標 (x, y, z) (m)：2.6740, 1.9339, −1.3955
視野最大幅 (m)　：3.2

≪ 立体図とカメラの構え方 ≫
カメラの構え方　：立ってカメラを構える
視点座標 (x, y, z)(m)　：7.0772, 1.3691, 0.4749
視野中心座標 (x, y, z)(m)　：2.6740, 1.9339, −1.3955
視点スクリーン間の距離 (m)　：2.3
視野最大角 (度)　：10

断面表示　　　　　　　　　　　　　　　　　　：あり
磁力線ドットサイズ　　　　　　　　　　　　　：小 (0.07mm)

≪ 構造物表示 ≫
真空容器　　　　　　　：表示
リミター　　　　　　　：表示
ヘリカルコイル　　　　：非表示
ヘリカルコイルの容器：非表示
垂直磁場コイル　　　　：非表示
磁気島コイル　　　　　：非表示
磁力線　　　　　　　　：表示

≪ 磁力線追跡 ≫
リミター　　　：追跡停止
真空容器透過：追跡停止

≪ コメント ≫
'sample'

≪PNG 出力 ≫
解像度：300(dpi)
PBS5cR9NY_NNN.png
PBS5cR9NY.gif

4　入力データの詳細

ここでは, LHD 磁気面・磁力線可視化プログラム「 LHD_lines_of_force.exe」が使用するデータを入力する GUI 画面と, そこで設定されるデータの詳細を記述する．LHD 磁気面・磁力線可視化プログラムのソース「 LHD_lines_of_force.f90」で使用している変数名も示す.

4.1　計算方法および出力ファイルの指定 (第 1 データ)

まず最初に閉ダイバータ対応か開ダイバータ対応かを指定し, 次に新規の計算か, あるいは計算済みデータの再画像化処理なのかを指定する．また、cad データの出力法を指定する．GUI 画面は次のようになっている.

計算方法
閉ダイバータ対応　開ダイバータ対応

CAD出力の設定
CAD出力
先頭から出力　最終地点から出力　容器，構造物衝突磁力線のみ描画
総ステップ数 200　描画間引き間隔 3
CAD Data　描画範囲：先頭トロイダル角 72 (度)　最終トロイダル角 108 (度)
描画方法：磁力線を線で出力 [線の太さ 7.0 (mm)]　磁気面を面で出力

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 1 に示す.

表 1: 第 1 入力データ詳細

	変数名	値	設定内容
1	j_cmp	= 1	磁力線追跡計算の実行.
		= 0	計算済みデータの再画像化処理の実行.
2	j_cad	= 1	**cad 出力** をクリックしたとき.
		= 0	**cad 出力** をクリックしないとき. cad データは出力しない.
3	l_cad_m	> 0	**先頭から出力**をクリックしたとき．描画総ステップ数が設定される.
		< 0	**最終地点から出力** クリックしたとき．描画総ステップ数にマイナス符号を付けた数値が設定される.
4	lsp	整数値	cad ファイルを小さくするための描画データの間引き間隔を指定する.

5	j_loss_only	= 1 = 0	**容器，構造物衝突磁力線のみ出力** をクリックしたとき. **容器，構造物衝突磁力線のみ出力** をクリックしないとき. すべて出力する.
6	ph_in_cad	実数値	cad データの先頭トロイダル角を指定する (単位: 度) .
7	ph_fn_cad	実数値	cad データの終端トロイダル角を指定する (単位: 度) .
8	d_cad	実数値	磁力線を描画する "太さ" を指定する (単位: mm) .
9	j_pnt_line	= 1 = 0	磁力線を線で描画するとき 磁気面を面で描画するとき
10	fl_rep	' ファイル名'	磁力線追跡結果を格納するファイル群 (注 1) の接頭辞を指定する．再計算の場合はファイル参照ボタンを押して探し出すこともできる．ファイル名はアポストロフィーで囲まなければならない.

(注 1) : 下記のファイル群が作成される. このときの接頭辞はPBSxxxxxx ('xxxxxx' は JOB ごとにシステムがランダムに生成) となる.

- 計算結果の格納 (バイナリファイル). 拡張子 $\Longrightarrow$ .40
- 画像ファイル (ポストスクリプトファイル). 拡張子 $\Longrightarrow$ .ps
- 画像ファイル (png ファイル). 拡張子 $\Longrightarrow$ _nnn.png ("nnn" は ps ファイルの頁番号)
- cad ファイル (dxf ファイル). 拡張子 $\Longrightarrow$ .dxf
- 最外殻磁気面磁力線軌道データ (バイナリファイル). 拡張子 $\Longrightarrow$ _lcfs.41
- 計測装置の視線に沿う磁場強度分布と、計測地点に対応する (磁力線で結ばれている) トムソン散乱計測地点とを明示するデータファイル (テキストファイル). 拡張子 $\Longrightarrow$ _THMSN.txt

入力されたデータの具体例を表 2 に示す.

表 2: 第 1 入力データの実例

入力例									
計算法	cad	テップ数	間引き間隔	全て/衝突	ϕ_0	ϕ_1	太さ	線 / 面	接頭辞
1	1	-200	3	0	72	108	7.0	1	'sample'

4.2 コイル電流値の設定 (第 2 データ)

第 2 入力データは LHD の磁場を作りあげる各コイル (ヘリカルコイル, 垂直磁場コイル, LID コイル: 表紙の図参照) の電流値を設定する．GUI 画面は次のようになっている.

LHD のヘリカル磁場は 2 対のヘリカルコイルで作り出される．それぞれのヘリカルコイルには 450 本（ヘリカルコイル合計では 900 本）の超伝導線が組み込まれている．各ヘリカルコイルの超伝導線は 3 層（O ブロック, M ブロック, I ブロック）に分割されていて, それぞれに電流値が設定できる.

ヘリカルコイルの作り出す垂直方向磁場を打ち消し, さらに, LHD 装置外部への漏洩磁場を大幅低減するため, LHD には上下対称の 3 対の垂直磁場コイル（OV コイル, IS コイル, IV コイル）が存在する．この垂直磁場コイルの電流値の制御で LHD は磁気面形状を様々に変形できる.

LID(Local Island Divertor) コイルは，U, L ポート (真空容器の上部, 下部に設置されたプラズマ観測孔) を取り囲む形で計２０個あり，それらの電流値で磁気島の生成あるいは消滅の制御を行う.

4.2.1 ヘリカルコイル電流, 垂直磁場コイル電流の設定

ヘリカルコイル, 垂直磁場コイルの電流値を設定する GUI 画面は次のようになっている.

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 3 に示す.

表 3: ヘリカルコイル, 垂直磁場コイル電流値入力データ詳細

	変数名	値	設定内容
1	cur_hc(1)	電流値 (A)	ヘリカルコイル外層 (O ブロック: $25 \times 6 = 150$ ターン) に流す電流値 lhd_O_curr を設定する.
2	cur_hc(2)	電流値 (A)	ヘリカルコイル中間層 (M ブロック: $25 \times 6 = 150$ ターン) に流す電流値 lhd_M_curr を設定する.
3	cur_hc(3)	電流値 (A)	ヘリカルコイル内層 (I ブロック: $25 + 23 \times 2 + 21 + 19 + 17 + 13 + 9 = 150$ ターン) に流す電流値 lhd_I_curr を設定する.

前ページ からの続き

	変数名	値	設定内容
4	cur_vt(1)	電流値 (A)	内径がもっとも大きな垂直磁場コイル (OV コイル: 9×16 = 144 ターン) に流す電流値 lhd_OV_curr を設定する.
5	cur_vt(2)	電流値 (A)	コイル中心位置がもっとも高所に位置する垂直磁場コイル (IS コイル: 13 × 16 = 208 ターン) に流す電流値 lhd_IS_curr を設定する.
6	cur_vt(3)	電流値 (A)	内径がもっとも小さな垂直磁場コイル (IV コイル: 15×16 = 240 ターン) に流す電流値 lhd_IV_curr を設定する.
7	rax_0	磁気軸 (m)	**磁気軸位置を指定する場合** をクリック: 指定した磁気軸位置が設定される. IS コイル電流値はニュートン法で計算する. **磁気軸位置を指定する場合** をクリックしないとき: 0 が設定される. IS コイル電流値は項目 (5) で設定した cur_vt(2) が設定される.
8	leak_B	漏れ磁場強度 (G)	指定した漏れ磁場強度が設定される. **磁気軸位置, 漏れ磁場強度を指定したたとき**：垂直磁場制御による磁気面最適化の解析が行われる. 通常は, 0 または ±10 以下. **漏れ磁場強度を入力しないとき**：100000 が設定される. 磁気軸 (rax_0) を指定しない場合は, 磁気軸位置, 漏れ磁場強度による垂直磁場制御による磁気面最適化の解析を行わない.
9	cmnt1	’コメント’	各コイルの電流値をいちいち述べる代わりに, LHD 磁場の特性 (磁気軸位置 R_{ax}, 磁気軸上磁場強度値 B_{ax}, γ 値等) で表現することも多い. それらを必要に応じて記入する. コメントはアポストロフィーで囲まなければならない このコメント cmnt1 は計算結果の図に記入される.
(注) 磁気軸位置 Rax, 四重極成分 Bq, γ 値 gamma, 磁気軸上磁場強度 Bax に値を設定し, CAL ボタンを押すと, コイル電流値の一覧表から, 各コイルの電流値が自動設定できる (LHD の標準的磁場配位の場合) .			

入力されたデータの具体例を表 4 に示す.

表 4: ヘリカルコイル, 垂直磁場コイル電流値入力データの実例

入力例								
H_O	H_M	H_I	OV	IS	IV	磁気軸	漏れ磁場強度	コメント
11000	11000	11000	−17967	−3007	11229	3.6	0.7	'R_{AX} = 3.6, B_{AX} = 2.75'

LHD の磁気軸形状は磁力線方程式とその変分に対する方程式

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}_{\mathrm{ax}}}{\mathrm{d}\ell} = \frac{\boldsymbol{B}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{ax}})}{|\boldsymbol{B}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{ax}})|} \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}\delta\boldsymbol{x}_{\mathrm{ax}}}{\mathrm{d}\ell} = (\delta\boldsymbol{x}_{\mathrm{ax}}\cdot\boldsymbol{\nabla})\left(\frac{\boldsymbol{B}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{ax}})}{|\boldsymbol{B}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{ax}})|}\right) \tag{2}$$

を用いニュートン法で決定する。トロイダル角 ϕ をトーラス一周に渡って 640 等分し、その分点上の位置 $(\boldsymbol{x}_n\,, n = 0, ..., 640)$ を配列に記憶し、任意の ϕ における磁気軸位置はスプライン補間で計算する。磁気軸上の回転変換は変分方程式 (??) の固有値で計算される。コイル電流値、磁気軸位置あるいは漏れ磁場強度の指定が極端に不適切なときは磁気軸位置が計算できず計算停止する場合がある。

磁気軸位置平均値 $\langle r_{\mathrm{ax}}\rangle$ と 磁気軸上磁場強度平均値 $\langle B_{\mathrm{ax}}\rangle$, 磁気軸上の比体積 U_{ax} および磁気軸上の回転変換 $\iota_{\mathrm{ax}}/2\pi$ の数値を磁力線追跡計算に先立って出力する.

4.2.2 LID コイル電流値の設定

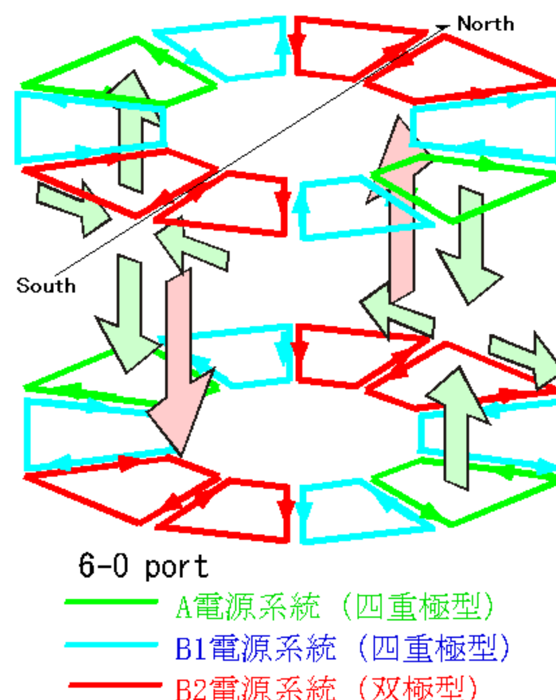
LID コイルを用いた磁気島の生成については,

http://www.lhd.nifs.ac.jp/lhd/jstr/lidtext/index.html (2006/9/28 現在)

に詳しい説明がある.

LID ヘッドの挿入される 6_O ポートに $m = 1, n = 1$ の磁気島を生成する原理と,それを 3 系統の電源 (A 電源系統, B1 電源系統, B2 電源系統) で実現するコイルの結線法が示されている. LID コイルの結線図とそれの作る双曲型, 4 重極型磁場の図を再録しよう. (右図)

$m = 1, n = 1$ の磁気島は, B2 電源系統で双極型 (主成分) の磁場 LHD に印加することで生成する. ただしこのときには, $m = 2, n = 1$ の磁気島が付随的に生成される. こ



の付随的 $m = 2, n = 1$ 磁気島は，A 電源系統と B1 電源系統で 4 重極型磁場 (主成分) を印加して消滅させる．

6_O ポートに $m = 1, n = 1$ の磁気島を作る標準値的コイル電流値は，表 5 のようになっている．

表 5: LID コイルの標準的電流値

$R_{\mathrm{ax}}(m)$	$B_{\mathrm{ax}}(T)$	A **電源系統** (A)	B1 **電源系統** (A)	B2 **電源系統** (A)
3.6	2.75	−1920	0	1920
3.75	2.75	1478	1056	1920

LID コイルの作る磁場は，コイルに流す電流値とターン数の積で決定される．LID コイルのターン数は 48 ターンなので，ターン数を 48 とすれば，本プログラムで使用されるデータ（電流値）は実電流値となる．LID コイルの電流値を設定する GUI 画面は次のようになっている．

☑ LIDコイル　ターン数 48　A系統(A) -1920 SET　B1系統(A) 0 SET　B2系統(A) 1920 SET

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U	92160	0	92160	0	-92160	-92160	0	-92160	0	92160
L	92160	0	-92160	0	-92160	-92160	0	92160	0	92160

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 6 に示す．

表 6: LID コイル電流値入力データ詳細

	変数名	**値**	**設定内容**
1	cur_lid1(1)	電流値 (AT)	U1 ポート LID コイルのアンペアターン数.
2	cur_lid1(2)	電流値 (AT)	U2 ポート LID コイルのアンペアターン数.
3	cur_lid1(3)	電流値 (AT)	U3 ポート LID コイルのアンペアターン数.
4	cur_lid1(4)	電流値 (AT)	U4 ポート LID コイルのアンペアターン数.
5	cur_lid1(5)	電流値 (AT)	U5 ポート LID コイルのアンペアターン数.
6	cur_lid1(6)	電流値 (AT)	U6 ポート LID コイルのアンペアターン数.
7	cur_lid1(7)	電流値 (AT)	U7 ポート LID コイルのアンペアターン数.
8	cur_lid1(8)	電流値 (AT)	U8 ポート LID コイルのアンペアターン数.
9	cur_lid1(9)	電流値 (AT)	U9 ポート LID コイルのアンペアターン数.
10	cur_lid1(10)	電流値 (AT)	U10 ポート LID コイルのアンペアターン数.
11	iota_U_port (注 3)	ポート番号	視線方向をポート番号で選択する．選択できるポート番号は，1 ～ 10.

前ページ からの続き

	変数名	値	設定内容
12	cur_lid2(1)	電流値 (AT)	L1 ポート LID コイルのアンペアターン数.
13	cur_lid2(2)	電流値 (AT)	L2 ポート LID コイルのアンペアターン数.
14	cur_lid2(3)	電流値 (AT)	L3 ポート LID コイルのアンペアターン数.
15	cur_lid2(4)	電流値 (AT)	L4 ポート LID コイルのアンペアターン数.
16	cur_lid2(5)	電流値 (AT)	L5 ポート LID コイルのアンペアターン数.
17	cur_lid2(6)	電流値 (AT)	L6 ポート LID コイルのアンペアターン数.
18	cur_lid2(7)	電流値 (AT)	L7 ポート LID コイルのアンペアターン数.
19	cur_lid2(8)	電流値 (AT)	L8 ポート LID コイルのアンペアターン数.
20	cur_lid2(9)	電流値 (AT)	L9 ポート LID コイルのアンペアターン数.
21	cur_lid2(10)	電流値 (AT)	L10 ポート LID コイルのアンペアターン数.
22	iota_U_max (注 4)	分割数	分布 ($\frac{\iota}{2\pi}, \frac{U}{U_{\mathrm{AX}}}$) の r 方向の分割数を指定する．デフォルトは, 20 程度．磁気島の位置, サイズ等を見るため詳細な分布が必要なら,200 程度に設定する.
(注 1)：A 系統，B1 系統，B2 系統に電流値を設定し, SET ボタンを押すと，それぞれの電源に対応する LID コイルのアンペア・ターン数（入力値 × ターン数）をまとめて設定することができる．LID コイルのターン数の実装値は 48 である． (注 2)：磁場を決定するアンペア・ターン数を 20 個のコイルについて, コイルの結線とは独立に, 直接指定することもできる. (注 3, 4)：GUI 画面は，12 を参照のこと.			

入力されたデータの具体例を表 7 に示す.

表 7: LID コイル電流値入力データの実例

入力例											
ターン数：48		**A 系統：** −1920		**B1 系統：** 0		**B2 系統：** 1920		**ポート番号 / 分割数**			
コイル	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U	92160	0	92160	0	−92160	−92160	0	−92160	0	92160	1
L	92160	0	−92160	0	−92160	−92160	0	92160	0	92160	10

4.2.3 LID ヘッドに対応する磁力線貫通図の設定

LID ヘッド位置での磁力線貫通図を作成するためのパラメータを設定する．LHD の中心 $(0, 0, 0)$ と LID ヘッドを結ぶ直線に直交する等間隔に設定された平面群での磁力線貫

通図を作成する．磁力線貫通図の横軸は水平方向, 縦軸は鉛直方向とする．LID ヘッド対応磁力線貫通図を作成するための GUI 画面は次のようになっている．

☑ LID head scan トロイダル角 180 最深部 r座標 4.2 (m) 最浅部 r座標 5.2 (m) 分割数 0 画面横幅 1.3 (m)

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 8 に示す.

表 8: LID ヘッド対応磁力線貫通図作成用入力データ詳細

	変数名	**値**	**設定内容**
1	ph_lid	トロイダル角 (度)	LID ヘッドを挿入するトロイダル角を指定する．6O ポートに挿入されている LID ヘッドなら, ph_lid= 180 である．
2	rst_lid	最深部 r 座標 (m)	最深部磁力線貫通図の位置を設定する．
3	rfn_lid	最浅部 r 座標 (m)	最浅部磁力線貫通図の位置を設定する．
4	lid_r_scn_bn	分割数 $= 0$ 分割数 > 0	LID ヘッド対応磁力線貫通図は作成しない. (rst_lid, rst_lid) の分割数を指定し, (lid_r_scn_bn+1) 枚の磁力線貫通図を作成する．
5	lid_wdth	画面横幅 (m)	磁力線貫通図の横（幅）の最大値を指定する．磁力線貫通図の縦（高さ）は自動設定される．

入力されたデータの具体例を表 9 に示す.

表 9: LID ヘッド対応磁力線貫通図作成用入力データの具体例

入力例				
トロイダル角 (度)	最深部 r 座標 (m)	最浅部 r 座標 (m)	分割数	画面横幅 (m)
180	4.2	5.2	50	1.3

4.3 Limiter Data と真空容器内構造物の設定 (第 3 データ)

LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」 には LHD のダイバータタイル, サイドリミター付の ICRF アンテナ、NBI (NBI 1 号機、NBI 2 号機、NBI 3 号機) アーマタイルが組み込まれている. また, 新規に構造物を追加することもできる.

ここでは, 新規構造物の組み込みを指定するとともに, これらの構造物を取り入れて磁力線追跡するのか, これらの構造物の存在を無視して, 磁力線追跡するのかを指定する. Limiter Data を設定する GUI 画面は次のようになっている.

Limiter Dataの設定
☑ DIVERTER ☐ NBI Armor Tiles
☑ ICRF Antenna 3.5UL振り角度 0 (度) 4.5UL後退量 0.07 (m) 7.5UL後退量 0.07 (m)
追加リミターなし Limiter Data File 参照... 移動距離(x,y,z) = (, ,)(m)

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 10 に示す.

表 10: リミターデータ設定用入力データの詳細

	変数名	値	設定内容
1	j_dvt_tile	= 0	**DIVERTER** をクリックしないとき. ダイバータタイルの存在は無視される.
		= 1	**DIVERTER** をクリックしたとき. ダイバータタイルを取り入れて磁力線追跡する.
2	j_armor	= 0	**NBI Armor Tiles** をクリックしないとき. アーマタイルの存在は無視される.
		= 1	**NBI Armor Tiles** をクリックしたとき. NBI アーマタイルを取り入れて磁力線追跡する.
3	j_icrf_antenna	= 0	**ICRF Antenna** をクリックしないとき. ICRF アンテナの存在は無視される.
		= 1	**ICRF Antenna** をクリックしたとき. ICRF アンテナを取り入れて磁力線追跡する.
4	del_antenna1(注 1)	3.5UL 振り角度 (度)	3.5UL(HAS) アンテナ の振り角度を指定する.
5	del_antenna2(注 1)	4.5UL 後退量 (m)	4.5UL アンテナの後退量を指定する.
6	del_antenna3(注 1)	7.5UL 後退量 (m)	7.5UL アンテナの後退量を指定する.
7	j_lmtr	= 0	**追加リミターなし**を選択したとき. 新規構造物を真空容器内に追加しない.
		= 1	**ユーザリミターを追加**を選択したとき. ユーザが指定した新規構造物を真空容器内に設置して磁力線解析を行う.

前ページ からの続き

	変数名	値	設定内容
		= 2	**LID ヘッドを追加**を選択したとき．6_$O-LID$ ヘッドを真空容器内に設置して磁力線解析を行う．このときは，LID ヘッドの構造を記述した csv ファイルの指定は不要.
8	x	x 軸方向移動距離 (m)	リミターの x 軸方向への移動距離を指定する.
9	y	y 軸方向移動距離 (m)	リミターの y 軸方向への移動距離を指定する.
10	z	z 軸方向移動距離 (m)	リミターの z 軸方向への移動距離を指定する.
11	fl_lmtr	’ファイル名’	真空容器内に設置する新規構造物を多辺形に分割し，その頂点を直交座標系 (単位: mm) で記述したカンマ区切りのテキストファイル (csv ファイル) を指定する．ファイル名はアポストロフィーで囲まなければならない．**参照**ボタンを押して表示されるファイル選択ダイアログから，ファイルを選択することもできる.
(注 1)：LHD の 3.5ULICRF アンテナ (HAS アンテナ) は振り角度の変更が行える. また 4.5UL および 7.5ULICRF アンテナはプラズマに近づけたり，プラズマから遠ざけたりすることができる．3.5ULICRF アンテナのデフォルトの振り角度は,del_antenna1 = 0.0 度．4.5UL および 7.5ULICRF アンテナの最大後退量 (真空容器壁際までアンテナを後退させたとき) は，del_antenna2 = 0.07 m，del_antenna3 = 0.07 m である.			

入力されたデータの具体例を表 11 に示す.

表 11: リミターデータの具体例

入力例										
ダイバータタイル	**アーマタイル**	**ICRF アンテナ**	3.5UL **アンテナ振り角度**	4.5UL **アンテナ後退量**	7.5UL **アンテナ後退量**	**新規構造物**	x	y	z	**ファイル名**
1	1	1	0.0	0.07	0.07	0	0	0	0	’smpl_lmtr.csv’

次に，新規構造物の構造を指定する csv ファイルの具体例を示す.

```
tileNo.,x0,y0,z0,x1,y1,z1,x2,y2,z2,x3,y3,z3,x4,y4,z4,x5,y5,z5,x6,y6,z6,/
101,3717.16,469.998,-1609.85,3702.74,470.005,-1594.16,3910.69,470,-1403.12,/
102,3598.07,470,-1594.33,3583.66,470.001,-1578.63,3791.6,469.996,-1387.61,3880.51,470.004,-1399.2,3894.93,470.003,-1414.9,3686.99,469.994,-1605.92,/
103,3479.09,470.003,-1578.81,3464.67,469.999,-1563.12,3672.62,470.002,-1372.1,3761.53,470.002,-1383.69,3775.95,469.995,-1399.39,3568.01,470,-1590.41,/
104,3310.2,470.004,-1556.79,3339.94,469.995,-1328.72,3641.9,470.006,-1368.09,3656.66,470.002,-1384.16,3449.03,470.005,-1574.89,/
105,3214,428,-1356,3171,464,-1349,3341,588,-1365,3420,588,-1375,3420,493,-1380,3340,493,-1369,3286,428.2,-1365.9,/
106,3085.3,485.571,-1275.4,3077.07,499.266,-1272.26,3220.23,604.049,-1353.67,3293.45,578.552,-1389.13,3301.69,564.853,-1392.28,3158.53,460.07,-1310.87,/
107,2993.29,519.73,-1227.9,2985.04,533.151,-1225.12,3094.11,648.722,-1295.8,3198.89,612.238,-1346.55,3207.29,598.57,-1349.37,3066.51,494.229,-1263.36,/
108,2910.52,532.437,-1142.7,2899.18,547.672,-1135,2999.94,674.485,-1237.49,3069.06,661.406,-1294.8,3080.4,646.177,-1302.5,2979.64,519.359,-1200.01,/
109,2820.66,551.151,-1065.36,2809.07,566.341,-1057.95,2907.06,692.671,-1163.67,2976.19,679.592,-1220.98,2987.77,664.403,-1228.39,2889.78,538.073,-1122.67,/
110,2730.86,570.012,-987.966,2719.01,585.137,-980.861,2814.06,710.831,-1089.97,2883.2,697.748,-1147.29,2895.04,682.613,-1154.39,2799.99,556.934,-1045.28,/
111,2641.14,589.034,-910.533,2631.08,601.522,-904.902,2706.29,731.719,-1004.25,2790.09,715.867,-1073.73,2802.21,700.815,-1080.51,2710.26,575.956,-967.844,/
112,2585.79,604.374,-800.006,2576.06,619.083,-789.563,2628.97,747.737,-921.423,2678.07,737.007,-996.974,2687.79,722.303,-1007.42,2634.89,593.649,-875.557,/
113,2522.63,620.12,-699.164,2512.59,634.739,-688.913,2562.03,762.573,-822.905,2611.13,751.843,-898.457,2621.17,737.209,-908.708,2571.73,609.39,-774.715,/
```

```
114,2459.5,635.982,-598.312,2449.14,650.52,-588.259,2494.98,777.36,-724.454,2544.08,766.631,-800.005,2554.44,752.092,-810.059,2508.6,625.252,-673.864,/
115,2402.78,650.594,-507.23,2397.38,798.751,-579.227,2476.92,781.374,-701.621,2487.62,766.937,-711.47,2445.52,641.256,-573.006,/
116,2314.76,691.95,-367.523,2313.88,714.414,-353.233,2401.71,805.141,-490.5,2427.6,778.81,-560.336,2362.94,642.952,-497.471,/
117,2288.81,748.107,-273.95,2287.63,764.402,-263.919,2349.04,833.885,-369.561,2379.35,803.068,-451.3,2380.52,786.774,-461.331,2319.12,717.284,-355.689,/
118,2252.67,789.455,-167.197,2250.95,805.849,-157.404,2307.59,876.167,-265.129,2337.9,845.343,-346.867,2339.62,828.964,-356.66,2282.98,758.637,-248.936,/
119,2216.52,830.973,-60.5085,2214.24,847.436,-50.9501,2265.97,918.366,-160.723,2296.29,887.542,-242.462,2298.57,871.088,-252.02,2246.82,800.156,-142.247,/
120,2214.54,852.868,56.4689,2217.54,864.389,65.5409,2253.23,944.869,-48.5239,2253.72,924.801,-133.159,2250.71,913.286,-142.228,2215.02,832.804,-28.1643,/
121,2215.71,879.784,167.772,2219.25,894.627,179.362,2251.4,973.975,67.8763,2251.91,952.65,-22.093,2248.37,937.793,-33.6828,2216.21,858.452,77.8028,/
122,2223.94,910.685,283.819,2225.9,925.901,295.316,2244.26,1008.4,183.001,2244.77,987.08,93.0319,2242.81,971.856,81.5364,2224.46,889.36,193.85,/
```

上記ファイルの説明

- 第一行目は任意のコメントである．プログラムの中では読み飛ばされる
- 第 2 行目以下の第一列はタイル番号を示す整数である．
- 第 2 列以下には構造物の表面を記述する多辺形 (3 角形, 4 辺形, 5 辺形, 6 辺形, 7 辺形) の頂点の直交座標値 (x, y, z) を mm 単位で記述する．1 行で記述できるデータは 7 辺形までである．8 以上の辺 (あるいは稜) を有する構造物外壁は再分割して, 7 以下の多辺形タイルデータの集合で表現しなければならない (複数行でデータを表現する．そのときタイル番号は同一であっても良い) ．
- 各行の最後には 1 行の最後を明示する / (スラッシュ) をつけること．
- LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」では, 1 行で記述された多辺形を 3 角形に分割して処理している．このとき, 分割法は下記に従う (図 2 参照).

$$
\begin{aligned}
(1,2,3,4) &\longrightarrow (1,2,3)+(3,4,1) \quad (4\text{ 辺形}) \\
(1,2,3,4,5) &\longrightarrow (1,2,3,4)+(1,4,5,1) \quad (5\text{ 辺形}) \\
(1,2,3,4,5,6) &\longrightarrow (1,2,3,4)+(1,4,5,6) \quad (6\text{ 辺形}) \\
(1,2,3,4,5,6,7) &\longrightarrow (2,4,5,6)+(1,2,6,7)+(2,3,4,2) \quad (7\text{ 辺形})
\end{aligned}
$$

- 通常の, 同一平面にある凸多角形ならば頂点の番号の付け方はほぼ自由である．ただし, 切り欠きのあるタイル, あるいは, 折れ曲がりのあるタイルではタイル番号の付け方には上記規則を念頭に置く必要がある．
- 4 辺形で指定していても, 第 3 頂点と第 4 頂点とが一致していたら 3 角形タイルと判定して対処する．

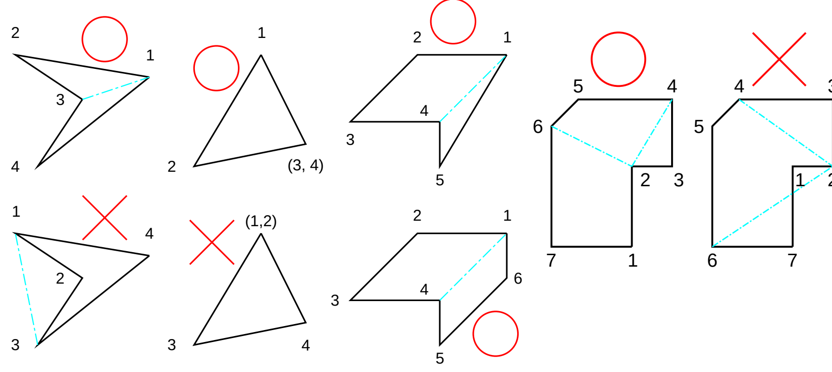


図 2: 多辺形タイルの頂点番号の付け方．「×」印は不適切な番号付けの例を示す．

4.4 最大トーラス周回数, 磁力線追跡方向、磁力線の回転変換と比体積の計算

LHD の磁力線構造を把握するには, 磁力線追跡をどこまで続けるかを適切に設定する必要がある．追跡距離が短すぎれば磁力線貫通図は粗となりすぎ, 磁気面領域と磁気島の区別さえもできにくくなる．磁力線追跡距離が長すぎれば, 計算データ量は膨大となり, それを用いた図形化処理が困難となることもある．問題に応じた適切な追跡距離を入力データとしてここで指定する．また, 磁力線追跡方向も問題によっては大きな意味を持つ．

計測器視線方向の磁場強度分布, 磁力線回転変換分布が必要となる場合もある．この要求に対応する入力データ指定もここで行う．

LHD の最外殻磁気面 (内外) 近傍には多数の大小様々な磁気島が存在する．磁気島上の磁力線に対する回転変換も磁気軸に対する回転変換を計算することにする．このため, 磁気島上では一定の回転変換となる．

回転ヘリカル座標系 (X, Y, ϕ) の下での磁気軸を $(X_{\rm ax}(\ell), Y_{\rm ax}(\ell), \phi_{\rm ax}(\ell))$, 磁力線を $(X(\ell), Y(\ell), \phi(\ell))$ で記す．ここで, ℓ は磁力線に沿う距離を表す．この磁力線の回転変換 $\iota/2\pi$ は

$$\frac{\iota}{2\pi} = \lim_{L\to\infty} \frac{\theta(L)-\theta(0)}{\phi(L)-\phi(0)} + p = \lim_{L\to\infty} \frac{L\,a_i + \tilde{\theta}(L)}{L\,a_p + \tilde{\phi}(L)} + p = \frac{a_i}{a_p} \tag{3}$$

で与えられる．ここで, $p(=5)$ は回転ヘリカル座標のピッチを表す。$\tilde{\theta}(L)$ と $\tilde{\phi}(L)$ は磁力線に沿うポロイダル角、トロイダル角の微少な増減を示す。a_i、 a_p は磁力線に沿うポロイダル角、トロイダル角の増加する平均速度を示し、次式で数値計算される。

$$a_i = \left\langle \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\ell}\theta(\ell) \right\rangle = \left\langle \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\ell} \tan^{-1}\left\{ \frac{Y(\ell)-Y_{\rm ax}(\ell)}{X(\ell)-X_{\rm ax}(\ell)} \right\} \right\rangle \tag{4}$$

$$a_p = \left\langle \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\ell}\phi(\ell) \right\rangle = \left\langle r(\ell) \frac{B_\phi(\ell)}{|\boldsymbol{B}(\ell)|} \right\rangle \tag{5}$$

磁気軸の式は (1) で与えられている．$\langle \cdots \rangle$ は磁力線に沿う平均を表し、平均操作を有限区間で高精度化するため, 具体的には窓関数 $W(\ell_0)$ を導入して次の手順に従う。

$$
\langle f \rangle \equiv \frac{\int_0^{L_0} \{f(L+\ell_0) - f(\ell_0)\} W(\ell_0) \mathrm{d}\ell_0}{\int_0^{L_0} W(\ell_0) \mathrm{d}\ell_0} \tag{6}
$$

窓関数としては次式を採用する.

$$
W(x) = \frac{\tanh\{(x+x_0)/d + (x+x_0)^3/d^3\} - \tanh\{(x-x_0)/d + (x-x_0)^3/d^3\}}{2} \tag{7}
$$

$$
-(x_0+2d) \le x \le x_0 + 2d\,,
$$

$$
0 \le \ell_0 (= x + x_0 + 2d) \le L_0 (= 2(x_0+2d))\,,
$$

$$
L + L_0 = L_{\max}
$$

周期的変動 $g_1(\ell)$, $h_1(\ell)$ の影響は L に反比例して小さくなること, 周期的関数 $g_1(\ell)$, $h_1(\ell)$ の平均操作による消滅は平均操作の区間幅 L_0 に反比例すると予想されるので, L_0 の値としては

$$
\min_{L_0} \left[\frac{1}{(L_{\max} - L_0) L_0} \right] \to L_0 = \frac{L_{\max}}{2} \tag{8}
$$

を採用する. さらに, $d = x_0/20$ と設定することにして, 当プログラムの窓関数のパラメータとしては

$$
x_0 = \frac{5}{22} L_{\max}\,, \quad d = \frac{5}{440} L_{\max} \tag{9}
$$

を採用した. さらに, 回転変換を計算するときには磁力線追跡長の上限をトーラス 200 周 ($L_{\max} \simeq 200 \times 2\pi \times 3.9 = 4.90 \cdots \mathrm{km}$) と設定する. すなわち, カオス磁力線でも真空容器壁までの磁力線結合長が $4.90 \cdots \mathrm{km}$ を超えるものに対しては回転変換を計算する.

磁力線の比体積 U の計算も同様に行う。N を磁力線のトロイダル回転数とすると $N = L\, a_p/2\pi$ の関係が成立するので、

$$
U = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N} \int \frac{\mathrm{d}\ell}{|\boldsymbol{B}(\ell)|} = \frac{2\pi}{a_p} a_u \tag{10}
$$

$$
a_u = \left\langle \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\ell} U(\ell) \right\rangle = \left\langle \frac{1}{|\boldsymbol{B}(\ell)|} \right\rangle \tag{11}
$$

となる。比体積分布、回転変換分布は指定した任意の視線方向に沿って計算できる。

磁力線追跡距離 (上限値) と追跡方向, および回転変換・比体積分布の分割数，ポート番号を指定する GUI 画面は次のようになっている.

出発地点
最大トーラス周回数 200 + −
回転変換・比体積分布 分割数 50
視線を回転ヘリカル座標で指定
視点とピボット地点を直交座標で指定
ポート番号 1
dx 0.001 (m) トロイダル角 0 (度) Y座標 0.1 (m)
視点座標(x) (m) 視点座標(y) (m) 視点座標(z) (m)
ピボット(x) (m) ピボット(y) (m) ピボット(z) (m)
追跡方向 −B方向 両方向 B方向

このGUI画面で設定されるデータの詳細を表12に示す．第3データ以下はj_iota_calより後のデータはすべて0. 入力された分割数およびポート番号はコイル電流値の後ろに設定される.

表 12: 磁力線追跡の最大トーラス周回数と追跡方向, および磁場強度テーブルと回転変換計算用の視線方向を設定するデータの詳細

	変数名	**値**	**設定内容**
1	mtn	最大トーラス周回数	磁力線追跡を追跡する最大のトーラス周回数を設定する．ダイバータ磁力線の特徴を把握するには $mtn = 20$ 程度で十分である.
2	j_tr_drctn	$= -1$	$-B$ **方向**をクリックしたとき．逆磁場方向に磁力線を追跡する.
		$= 0$	**両方向**をクリックしたとき．磁場方向と逆磁場方向の両方に磁力線を追跡する.
		$= 1$	B **方向**をクリックしたとき．磁場方向に磁力線を追跡する.

入力されたデータの具体例を表13に示す.

表 13: 磁力線追跡の最大トーラス周回数と追跡方向の具体例

入力例	
mtn	j_tr_drctn
200	0

4.5 出発地点 (第5データ, 第6データ)

ここではまず最初に, LHD磁気面･磁力線可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」が採用している, 回転ヘリカル座標系 [1] と, 円柱座標系, 直交座標系との関係を説明する.

空間の任意の地点 $\boldsymbol{x}$ を記述する各座標系 (回転ヘリカル座標系, 円柱座標系, 直交座標系) での座標値に関する要点をまとめる.

$$
\begin{aligned}
(X, Y, \phi) &: \text{回転ヘリカル座標系} \\
(r, \phi, z) &: \text{円柱座標系} \\
(x, y, z) &: \text{直交座標系}
\end{aligned}
$$

r_0 で回転ヘリカル座標系の回転半径を表し, p でヘリカル回転のピッチ数を表す．LHDで

は, $r_0 = 3.9\,\mathrm{m}\,,\quad p = 5$ である. 次の関係が成り立つ.

$$
\begin{aligned}
r &= r_0 + X\cos\theta - Y\sin\theta \\
z &= X\sin\theta + Y\cos\theta \\
\theta &\equiv p\phi \\
x &= r\sin\phi \\
y &= r\cos\phi
\end{aligned}
$$

ここでの円柱座標系は LHD の装置設計に合わせて, 装置を天井から見て, 時計回りにトロイダル角 ϕ が設定されていることに注意しなければならない.

$$
\begin{aligned}
x\,\text{軸方向} &: \text{東} \\
y\,\text{軸方向} &: \text{北} \\
z\,\text{軸方向} &: \text{鉛直上方} \\
\phi = 0 &: y\,\text{軸 (真北)}
\end{aligned}
$$

$$
\boldsymbol{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = X\boldsymbol{i} + Y\boldsymbol{j} - r_0\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{k}}{\mathrm{d}\phi}
$$

ここで, $(\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k})$ は回転ヘリカル座標系での規格化直交ベクトルで, 直交座標系での成分は次のようになる.

$$
(\boldsymbol{i}\,, \boldsymbol{j}\,, \boldsymbol{k}) = \begin{pmatrix} \cos\theta\sin\phi, & -\sin\theta\sin\phi, & \cos\phi \\ \cos\theta\cos\phi, & -\sin\theta\cos\phi, & -\sin\phi \\ \sin\theta, & \cos\theta, & 0 \end{pmatrix}.
$$

直交座標系から回転ヘリカル座標系への変換は次式のようになる.

$$
\begin{aligned}
r &= \sqrt{x^2 + y^2}\,, \\
\phi &= \tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right)\,, \\
X &= \quad (r - r_0)\cos\theta + z\sin\theta\,, \\
Y &= -(r - r_0)\sin\theta + z\cos\theta\,.
\end{aligned}
$$

任意のベクトル $\boldsymbol{A}$ は回転ヘリカル座標系での成分 (A_X, A_Y, A_ϕ) を使って次式で表される.

$$
\boldsymbol{A} = A_X\boldsymbol{i} + A_Y\boldsymbol{j} + A_\phi\boldsymbol{k}\,.
$$

磁力線追跡の出発地点を定める座標系を設定する GUI 画面は次のようになっている.

出発点記述座標系	◉ 回転ヘリカル座標系 ○ 円柱座標系 ○ 直交座標系 ○ カオス磁力線と磁気面 ☐ カオス磁力面領域の磁気島のみプロット 0 0 0 0 0 0 参考 0

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 14 に示す.

j_crdnt の値により, 設定するパラメータの個数や意味は変化する.

表 14: 磁力線追跡の出発地点記述用座標系を設定する入力データ詳細

	変数名	値	設定内容
1	j__crdnt	= 0	**回転ヘリカル座標系**をクリックしたとき．回転ヘリカル座標系で指定した正方形領域に出発地点を設定する．
		= 1	**円柱座標系**をクリックしたとき．円柱座標系で指定した正方形領域に出発地点を設定する．
		= 2	**直交座標系**をクリックしたとき．直交座標系で指定した正方形領域に出発地点を設定する．
		= 3	**カオス磁力線と磁気面**をクリックしたとき．カオス磁力線領域の全体像と磁気面とを解析する．

4.5.1 回転ヘリカル座標系 (j__crdnt= 0 の場合)

回転ヘリカル座標で指定した正方形領域に出発地点を設定するためには, j__crdnt= 0 と設定する．このときの GUI 画面は次のようになっている．

出発点記述座標系
回転ヘリカル座標系 円柱座標系 直交座標系 カオス磁力線と磁気面
カオス磁力面領域の磁気島のみプロット
0 -0.3 1.3 16 -0.001 0.001 参考
2 0 0 0 0

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 15 に示す．

表 15: 回転ヘリカル座標系で記述する出発地点用入力データの詳細

	変数名	値	設定内容
1	ph0	トロイダル角 (度)	出発地点のトロイダル角を指定する．
2	x00	先頭 X 座標 (m)	出発地点の先頭 X 座標を指定する．
3	x11	終端 X 座標 (m)	出発地点の終端 X 座標を指定する．
4	nx00	X 方向分割数	出発地点の X 方向分割数を指定する．(0 以上の整数)
5	y00	先頭 Y 座標 (m)	出発地点の先頭 Y 座標を指定する．
6	y11	終端 Y 座標 (m)	出発地点の終端 Y 座標を指定する．
7	ny00	Y 方向分割数	出発地点の Y 方向分割数を指定する．(0 以上の整数)

入力されたデータの具体例を表 16 に示す．

4.5.2 円柱座標系 (j__crdnt= 1 の場合)

円柱座標系で指定した正方形領域に出発地点を設定するためには, j__crdnt= 1 と設定する．このときの GUI 画面は次のようになっている．

表 16: 回転ヘリカル座標系で記述する出発地点用入力データの具体例

入力例						
出発地点のトロイダル角	**先頭 X 座標**	**終端 X 座標**	**X 方向分割数**	**先頭 Y 座標**	**終端 Y 座標**	**Y 方向分割数**
0	−0.3	1.3	16	−0.001	0.001	2

出発点記述座標系
回転ヘリカル座標系　円柱座標系　直交座標系　カオス磁力線と磁気面
カオス磁力面領域の磁気島のみプロット
0　3.6　5.2　16　-0.001　0.001　参考
2　0　0　0　0

このGUI画面で設定されるデータの詳細を表17に示す.

表 17: 円柱座標系で記述する出発地点用入力データの詳細

	変数名	**値**	**設定内容**
1	ph0	トロイダル角 (度)	出発地点のトロイダル角を指定する.
2	r00	先頭 r 座標 (m)	出発地点の先頭 r 座標を指定する.
3	r11	終端 r 座標 (m)	出発地点の終端 r 座標を指定する.
4	nx00	X 方向分割数	出発地点の r 方向分割数を指定する. (0以上の整数)
5	z00	先頭 z 座標 (m)	出発地点の先頭 z 座標を指定する.
6	z11	終端 z 座標 (m)	出発地点の終端 z 座標を指定する.
7	ny00	Y 方向分割数	出発地点の z 方向分割数を指定する. (0以上の整数)

入力されたデータの具体例を表18に示す.

表 18: 円柱座標系で記述する出発地点用入力データの具体例

入力例						
出発地点のトロイダル角	**先頭 r 座標**	**終端 r 座標**	**r 方向分割数**	**先頭 z 座標**	**終端 z 座標**	**z 方向分割数**
0	3.6	5.2	16	−0.001	0.001	2

4.5.3 直交座標系 (j_crdnt= 2 の場合)

直交座標系で指定した正方形領域に出発地点を設定するためには, j_crdnt= 2 と設定する. ダイバータタイル上に埋め込まれたプローブ列に到達する磁力線群解析等を想定し, それに適した入力様式とした. このときのGUI画面は次のようになっている.

出発点記述座標系	○ 回転ヘリカル座標系 ○ 円柱座標系 ◉ 直交座標系 ○ カオス磁力線と磁気面 □ カオス磁力面領域の磁気島のみプロット 2.3383 0.678636 0.162300 0.04358 0 0 参考 10 2.3383 0.678636 0.162300 0

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 19 に示す.

表 19: LID コイル電流値入力データ詳細

	変数名	値	設定内容
1	x00	中心 x 座標 (m)	出発地点の中心の x 座標を指定する.
2	y00	中心 y 座標 (m)	出発地点の中心の y 座標を指定する.
3	z00	中心 z 座標 (m)	出発地点の中心の z 座標を指定する.
4	x11	第一掃引方向終端 x 成分 (m)	出発地点の第一掃引方向終端の x 成分.
5	y11	第一掃引方向終端 y 成分 (m)	出発地点の第一掃引方向終端の y 成分.
6	z11	第一掃引方向終端 z 成分 (m)	出発地点の第一掃引方向終端の z 成分.
7	nx00	第一掃引方向への分割数	第一掃引方向への分割数を指定する.
8	x22	第二掃引方向終端 x 成分 (m)	出発地点の第二掃引方向終端の x 成分.
9	y22	第二掃引方向終端 y 成分 (m)	出発地点の第二掃引方向終端の y 成分.
10	z22	第二掃引方向終端 z 成分 (m)	出発地点の第二掃引方向終端の z 成分.
11	ny00	第二掃引方向への分割数	第二掃引方向への分割数を指定する.

出発地点の初期値 $\boldsymbol{x}_0$ は

$$\boldsymbol{x}_0 = \boldsymbol{x}_{00} + \sum_{i=-nx00}^{nx00} \sum_{j=-ny00}^{ny00} i\frac{\boldsymbol{x}_{11} - \boldsymbol{x}_{00}}{nx00} + j\frac{\boldsymbol{x}_{22} - \boldsymbol{x}_{00}}{ny00}$$

と設定される.

4.5.4 カオス磁力線領域の全体像と磁気面の解析 (j_crdnt= 3 の場合)

LHD 実験に対応できる磁気面領域とカオス磁力線領域の全体像を解析するためには, j_crdnt= 3 と設定する.

まず最初にカオス磁力線領域の全体像得る手続きを説明する. LHD 実験に対応できるカオス磁力線領域の全体像得るには,

- 磁力線の出発地点を磁気面近傍の内外に均等に設定すること, 真空容器壁に到達しなかった磁力線追跡結果は捨てること,
- 磁力線がカオスとなる基本過程 (磁力線の引き延ばし過程と折りたたみ過程: stretching and folding[2]) を経験しない磁力線 (真空容器壁から, 真空容器壁へと極端に短い結合長で結ばれている磁力線) は取り除くこと.

等が要求される．LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「 LHD_lines_of_force.exe」では, 下記のプロセスでこの要求に応える．

- **1 ）** 出発点のトロイダル角, 方位角は均等に配置する．トロイダル角, 方位角を一つ定めた後, 最外殻磁気面の外側から磁気軸に向け, 径方向に均等に出発地点移動しながら磁力線追跡を行う．
- **2 ）** 磁力線結合長が極端に短い磁力線は捨てる．捨てる磁力線の結合長は第 7 データ (39 頁参照) の cnl_mnd で指定する．
- **3 ）** 第 4 データ (31 頁参照) で指定した磁力線追跡打ち切りの最大トーラス周回数 (=mtn) に達しても真空容器壁に到達しなかった磁力線追跡が連続 3 回続いたら (磁気軸に向けて, 径方向に移動しているとき), 磁気面領域に到達したと判断して次の方位角, トロイダル角での計算に移行する．

最外殻磁気面の外の計算で, 第 4 データで指定した磁力線追跡打ち切りの最大トーラス周回数 (=mtn) に達しても真空容器壁に到達しなかった磁力線は, 磁力線貫通図をプロットしない．すなわち, カオス磁力線領域に埋め込まれている磁気島の貫通図は, 通常, 白抜けとなる．

カオス磁力線領域の全体像と磁気面の解析を指示する GUI 画面は次のようになっている．

出発点記述座標系	○ 回転ヘリカル座標系 ○ 円柱座標系 ○ 直交座標系 ◉ カオス磁力線と磁気面 ☐ カオス磁力面領域の磁気島のみプロット 50 / 5 / 7 / 0.1 / 0 / 0 / 参考 0 / 0 / 0 / 0 / 0

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 20 に示す．

表 20: カオス磁力線領域の全体像と磁気面の解析用入力データ詳細

	変数名	**値**	**設定内容**
1	nx00	径方向分割数 (整数)	出発地点の径方向分割数を指定する．
		長径 (短径) は 1.3 $\longrightarrow$ 0.65 (0.65 $\longrightarrow$ 0.325) を nx00 分割する．	
2	ny00	方位角方向分割数 (整数)	出発地点の方位角方向分割数を指定する．
		方位角方向ついては 0 $\longrightarrow$ 2π を ny00 分割する．	
3	nph00	トロイダル方向分割数 (整数)	出発地点のトロイダル方向分割数を指定する．
		トロイダル方向ついては 1 ヘリカルピッチ (0 $\longrightarrow$ $\pi/5$) を nph00 分割する (注 1)．	
4	del_ms	磁気面枚数	磁気面貫通図に描画する磁気面の数を指定する．

前ページ からの続き

	変数名	値	設定内容
5	j_chaos_fln_plot	= 0 (標準) = 1 (例外)	**カオス磁力線領域の磁気島のみプロット**をクリックしないとき．磁力線領域の全体像をプロットする． **カオス磁力線領域の磁気島のみプロット**をクリックしたとき．カオス磁力線領域の磁気島のみプロットする(注 2)．
(注 1)：ヘリカル磁場には対称性があるので計算の無駄 (実質的に同一地点からの磁力線追跡の重複) を避けるため, nph00 は素数が望ましいと思われる． (注 2)：j_chaos_fln_plot= 1 を設定した場合, 第 4 データ (31 頁参照) で指定した磁力線追跡打ち切りの最大トーラス周回数 (=mtn) に達しても真空容器壁に到達しなかった磁気島, 磁気面, 結合長の極端に長い磁力線の貫通図が得られる．最外殻磁気面外で比較的低温のプラズマを保持しているカオス磁力線領域を示す．			

入力されたデータの具体例を表 21 に示す．

表 21: カオス磁力線領域の全体像と磁気面の解析用入力データの具体例

入力例				
径方向分割数	**方位角方向分割数**	**トロイダル方向分割数**	**磁気面枚数**	**カオス磁力線領域の磁気島のみプロット**
50	5	7	10	0

4.6 描画最短磁力線結合長 (第 7 データ)

カオス磁力線領域を把握するためには, 真空容器壁から真空容器壁へと, 極端に短い磁力線結合長で結びつけられている磁力線は描画しないことが必要である．

描画最短磁力線結合長を設定する GUI 画面は次のようになっている．

計算条件 & 出力条件
描画最短磁力線結合長(トーラス周回数) 0.5 + -

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 22 に示す．

入力されたデータの具体例を表 23 に示す．

4.7 子午面断面磁力線貫通図 (第 8 データ)

LHD の磁気面, カオス磁力線領域, ダイバータレッグの形状を把握する最も代表的な方法が, トロイダル角を指定した子午面での磁力線貫通図を示す方法である．子午面断面磁力線貫通図の作成を指示する GUI 画面は次のようになっている．

表 22: 描画最短磁力線結合長を設定する入力データの詳細

	変数名	**値**	**設定内容**
1	cnlmnd(注 1)	トーラス周回数	描画する磁力線の最短結合長の値を設定する.

(注 1)：磁力線の結合長 (磁力線が真空容器壁に到達するまでの磁力線長) L_{cnl} が

$$L_{cnl} < 2\pi r_0 \times cnlmnd$$

の場合には, その磁力線は捨て去られる. $cnlmnd = 0.2$ の場合は磁力線貫通図に初期位置の配置状況を直接反映するものが現れる.(カオス磁力線ではない磁力線の貫通図が現れる)．カオス磁力線の構造を見出すには $cnlmnd = 0.5$ 程度が適切である.

表 23: 描画最短磁力線結合長を設定する入力データ具体例

入力例
描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数)
0.5

子午面断面磁力線貫通図 先頭トロイダル角 (度) 最終トロイダル角 (度) 分割数 0, 27, 3 ☑ヘリカル対称性 ☐拡大図表示

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 24 に示す.

表 24: 子午面断面磁力線貫通図作成入力データ詳細

	変数名	**値**	**設定内容**
1	plt_ph_in	先頭トロイダル角 (度)	磁力線貫通図を描く子午面の先頭トロイダル角を指定する.
2	plt_ph_fn	最終トロイダル角 (度)	磁力線貫通図を描く子午面の最終トロイダル角を指定する.
3	plt_ph_bn	分割数 (整数)	トロイダル角の分割数を指定する (注 1).
4	j_hl_prd	= 1	**ヘリカル対称性**をクリックしたとき．ヘリカル対称性の成立を仮定して描画する (注 2).
		= 0	**ヘリカル対称性**をクリックしないとき．描画に際してヘリカル対称性を仮定しない.
5	j_dtl	= 1	**拡大図表示**をクリックしたとき. 横長断面での最外殻磁気面からダイバータレッグの根本部分および縦長断面での内壁近辺を拡大して示す.
		= 0	**拡大図表示**をクリックしないとき. 真空容器の断面全体での磁力線貫通図を作成する.

前ページ からの続き

	変数名	値	設定内容

(注 1)：磁力線貫通図が作成される子午面断面のトロイダル角は次式で与えられる.

$$\phi(n) = plt_ph_in + n \times \frac{plt_ph_fn - plt_ph_in}{plt_ph_bn}, \quad n = 0, 1, \cdots, plt_ph_bn\,.$$

(注 2)：LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」は, トーラス全周を使って磁力線を追跡しているため, 通常のヘリカル対称性 (1 ヘリカルピッチ $= \pi/5$) が成立する配位の計算では, $j_hl_prd = 1$ と設定すれば計算効率は 10 倍高くなる (1 本の磁力線追跡計算が 10 本分の磁力線のデータを提供する). そのため通常の計算では, 次のように設定するべきである.

$$j_hl_prd = 1$$

入力されたデータの具体例を表 25 に示す.

表 25: 子午面断面磁力線貫通図作成入力データの具体例

入力例				
先頭トロイダル角	**最終トロイダル角**	**トロイダル角分割数**	**ヘリカル対称性**	**拡大図**
18	54	36	1	0

4.8 等高線 (磁力線貫通図に書き込む磁場強度) 記入法の設定 (第 9 データ)

磁力線貫通図に書き込む磁場強度に対する指定を行なう.
GUI 画面は次のようになっている.

等高線　種別 なし　ΔB　B0

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 26 に示す.

表 26: 等高線の記入法を指定する入力データ詳細

	変数名	値	設定内容
1	j_bplot	= 0	磁力線貫通図に磁場強度分布は書き込まない.
		= 1	磁力線貫通図に B_X の等高線を書き込む.
		= 2	磁力線貫通図に B_Y の等高線を書き込む.
		= 3	磁力線貫通図に B_ϕ の等高線を書き込む.
		= 4	磁力線貫通図に $\|\boldsymbol{B}\|$ の等高線を書き込む.
2	del_b	磁場強度の間隔 (T)	磁場強度分布等高線図における等高線の間隔を指定する.

前ページ からの続き

	変数名	値	設定内容
3	std_b	基準磁場強度 (T)	磁場強度分布等高線の基準の高さを指定する．この高さの等高線は, 黒色の一点鎖線で描画する.

入力されたデータの具体例を表 27 に示す.

表 27: 等高線の記入法を指定する入力データの具体例

入力例		
磁場強度等高線に対する指定	**磁場強度の間隔**	**基準磁場強度**
0	0.1	2.75

4.9 任意断面磁力線貫通図 (第 10 データ)

LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「 LHD_lines_of_force.exe」は, 磁力線貫通図を作成する平面を任意に設定できる．これにより LHD に設置された計測装置の前方に展開されている磁気面・磁力線の構造を求める．このときには、計測装置視線上の磁場強度分布、回転変換分布、比体積分布を出力する。更に、計測装置視線上の地点とトムソン散乱計測装置による計測地点との対応を示すデータも出力する。磁力線貫通図を作成する平面を指定するデータの入力方法は三通り用意した.

第一の方法は, 視点と視野中心を指定し, 平面の向きは大まかに指定する方法である. すなわち, 視点 (計測装置設置地点) と視野中心 (計測装置の視野中心) とを結ぶベクトル (第一のベクトル) と, パラメータで指定する第二のベクトルを用いて指定する方法である.

第二の方法は, 計測装置上の 2 点 ($\boldsymbol{x}_1$, $\boldsymbol{x}_2$) と視野中心 ($\boldsymbol{x}_0$) とで指定する方法である. このとき, 視点は $(\boldsymbol{x}_1 + \boldsymbol{x}_2)/2$ と仮定する.

第三の方法は視野内の 2 点 ($\boldsymbol{x}_1$, $\boldsymbol{x}_2$) と視点 ($\boldsymbol{x}_0$) とで指定する方法である．このとき, 視野中心は $(\boldsymbol{x}_1 + \boldsymbol{x}_2)/2$ と仮定する.

任意断面磁力線貫通図の作成を指示したときは下記も実行する。

- 視線に沿う磁力線の比体積分布と磁力線回転変換分布とを出力する。磁気井戸が存在するときは磁気井戸存在領域を明示する。

- 視線に沿う磁場強度分布と、計測地点に対応する (磁力線で結ばれている) トムソン散乱計測地点とを明示する。

- 上記データをテキストファイルに出力する。

4.9.1 第一の方法で任意断面磁力線貫通図を作成する場合)

第一の方法で任意断面磁力線貫通図の作成を指示する GUI 画面は次のようになっている.

第一の方法で任意断面磁力線貫通図を作成する平面を指定するときの, GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 28 に示す.

表 28: 第一の方法で任意断面磁力線貫通図の作成を指定する入力データ詳細

	変数名	値	設定内容
1	j_arb_pln	= 0	**任意断面磁力線貫通図の作成**をクリックしないとき. 任意断面での貫通図は作成せず、以下は無視.
任意断面画像の原点 (0, 0) は視野中心位置を示す. 任意断面画像の横軸は, 視野中心から視点へと向かう方向 (単位ベクトル = $\boldsymbol{n}_0$ とする). 任意断面画像の縦軸方向 (単位ベクトル = $\boldsymbol{n}_2$) は下記の規則で定める. 視野中心でのトロイダル方向単位ベクトルを $\boldsymbol{n}_\phi$, 径方向単位ベクトルを $\boldsymbol{n}_r$, 鉛直方向単位ベクトルを $\boldsymbol{n}_z$ とする.			
1	j_arb_pln	= 1 = 2 = 3	**ほぼ垂直な平面 (O ポートから)** をクリックしたとき. $\boldsymbol{n}_2 = \boldsymbol{n}_\mathbf{0} \times \boldsymbol{n}_\phi$ とする. **ほぼ垂直な平面 (接線ポートから)** をクリックしたとき. $\boldsymbol{n}_2 = \boldsymbol{n}_\mathbf{0} \times \boldsymbol{n}_r$ とする. **ほぼ水平な平面**をクリックしたとき. $\boldsymbol{n}_2 = \boldsymbol{n}_\mathbf{0} \times \boldsymbol{n}_z$ とする.
2	arb_pln_eyex	視点 x 座標 (m)	視点の x 座標を指定する.
3	arb_pln_eyey	視点 y 座標 (m)	視点の y 座標を指定する.
4	arb_pln_eyez	視点 z 座標 (m)	視点の z 座標を指定する.
5	arb_pln_cntx	視野中心 x 座標 (m)	視野中心の x 座標を指定する.
6	arb_pln_cnty	視野中心 y 座標 (m)	視野中心の y 座標を指定する.
7	arb_pln_cntz	視野中心 z 座標 (m)	視野中心の z 座標を指定する.
8	max_scr	視野の最大幅 (m)	トーラスを平面で切断したとき, 断面が 2 個生成される場合がある. 視野中心に位置する断面に貫通図を限定するため, 視野の最大幅を max_scr で指定する.

入力されたデータの具体例を表 29 に示す.

この例は, 3T ポートに設置された ccd カメラを視点とし, 2U ポートの起立ダイバータタイル近辺を視野中心としている状況を設定している. 貫通図の縦軸はほぼ鉛直方向となっている.

表 29: 第一の方法で任意断面磁力線貫通図の作成を指定する入力データの具体例

入力例							
任意断面貫通図の有無と断面の向き	**視点 x 座標**	**視点 y 座標**	**視点 z 座標**	**視野中心 x 座標**	**視野中心 y 座標**	**視野中心 z 座標**	**視野の最大幅**
1	7.0772	1.3691	0.4749	2.6740	1.9339	-1.3955	3.2

4.9.2 第二の方法で任意断面磁力線貫通図を作成する場合)

第二の方法で任意断面磁力線貫通図の作成を指示する GUI 画面は次のようになっている.

☑ 任意断面磁力線貫通図
○ほぼ垂直な平面(0ポートから)
○ほぼ垂直な平面(接線ポートから)
○ほぼ水平な平面
◉計測装置上の2点
○視野内の2点
計測装置上の第1座標(x) 計測装置上の第1座標(y) 計測装置上の第1座標(z)
計測装置上の第2座標(x) 計測装置上の第2座標(y) 計測装置上の第2座標(z)
視野中心座標(x) 視野中心座標(y) 視野中心座標(z)
視野最大幅 (m)
参考

第二の方法で任意断面磁力線貫通図を作成する平面を指定するときの, GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 30 に示す.

表 30: 計測装置上の 2 点と視野中心とを指定して磁力線貫通図を作成するとき

	変数名	値	設定内容
1	j_arb_pln	$= 4$	**計測装置上の 2 点指定**をクリックしたとき. 貫通図平面は計測装置上の 2 点と視野中心とで定まる平面. 貫通図原点 (0, 0) は視野中心位置 $(= \boldsymbol{x}_0)$ を示す. 貫通図の横軸は, 視野中心位置 $(= \boldsymbol{x}_0)$ から視点 $(= (\boldsymbol{x}_1 + \boldsymbol{x}_2)/2)$ へと向かう方向 $(= \boldsymbol{n}_0)$ とする. 貫通図の縦軸方向は指定した計測装置上の 2 点を結ぶ方向 $(= \boldsymbol{n}_0 \times \{(\boldsymbol{x}_1 - \boldsymbol{x}_2) \times \boldsymbol{n}_0\})$ である.
2	arb_pln_1x	x 座標 (m)	計測装置上第一点の x 座標を指定する.
3	arb_pln_1y	y 座標 (m)	計測装置上第一点の y 座標を指定する.
4	arb_pln_1z	z 座標 (m)	計測装置上第一点の z 座標を指定する.
5	arb_pln_2x	x 座標 (m)	計測装置上第二点の x 座標を指定する.
6	arb_pln_2y	y 座標 (m)	計測装置上第二点の y 座標を指定する.
7	arb_pln_2z	z 座標 (m)	計測装置上第二点の z 座標を指定する.
8	arb_pln_0x	視野中心 x 座標 (m)	視野中心の x 座標を指定する.
9	arb_pln_0y	視野中心 y 座標 (m)	視野中心の y 座標を指定する.
10	arb_pln_0z	視野中心 z 座標 (m)	視野中心の z 座標を指定する.

前ページ からの続き

	変数名	値	設定内容
11	max_scr	視野の最大幅 (m)	表 (28) 第 8 項目参照.

4.9.3 第三の方法で任意断面磁力線貫通図を作成する場合)

第三の方法で任意断面磁力線貫通図の作成を指示する GUI 画面は次のようになっている.

☑ 任意断面磁力線貫通図
○ ほぼ垂直な平面(Oポートから)
○ ほぼ垂直な平面(接線ポートから)
○ ほぼ水平な平面
○ 計測装置上の2点
◉ 視野内の2点

視野内の第1座標(x) 視野内の第1座標(y) 視野内の第1座標(z)
視野内の第2座標(x) 視野内の第2座標(y) 視野内の第2座標(z)
視点座標(x) 視点座標(y) 視点座標(z)
視野最大幅 (m) 参考

第三の方法で任意断面磁力線貫通図を作成する平面を指定するときの, GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 31 に示す.

表 31: 視野内の 2 点と視点とを指定して磁力線貫通図を作成するとき

	変数名	値	設定内容
1	j_arb_pln	= 5	**視野内の 2 点指定**をクリックしたとき．貫通図平面は視野内の 2 点と視点とで定まる平面．貫通図原点 (0, 0) は視野中心位置を示す．貫通図の横軸は, 視野中心 $(=(\boldsymbol{x}_1+\boldsymbol{x}_2)/2)$ から視点 $(=\boldsymbol{x}_0)$ へと向かう方向 $(=\boldsymbol{n}_0)$ とする．貫通図の縦軸方向は指定した視野内の 2 点を結ぶ方向 $\left(=\boldsymbol{n}_0\times\left[(\boldsymbol{x}_1-\boldsymbol{x}_2)\times\boldsymbol{n}_0\right]\right)$ である．
2	arb_pln_1x	x 座標 (m)	視野内第一点の x 座標を指定する．
3	arb_pln_1y	y 座標 (m)	視野内第一点の y 座標を指定する．
4	arb_pln_1z	z 座標 (m)	視野内第一点の z 座標を指定する．
5	arb_pln_2x	x 座標 (m)	視野内第二点の x 座標を指定する．
6	arb_pln_2y	y 座標 (m)	視野内第二点の y 座標を指定する．
7	arb_pln_2z	z 座標 (m)	視野内第二点の z 座標を指定する．
8	arb_pln_0x	視点 x 座標 (m)	視点の x 座標を指定する．
9	arb_pln_0y	視点 y 座標 (m)	視点の y 座標を指定する．
10	arb_pln_0z	視点 z 座標 (m)	視点の z 座標を指定する．
11	max_scr	視野の最大幅 (m)	表 (28) 第 8 項目参照.

4.10　立体図とカメラの構え方 (第 11 データ)

磁力線, 磁気面等をカメラで写し取る概念の下で, 立体図を作成する．磁力線追跡の 1 ステップ毎の位置を 3 次元的にプロットする．このとき, 真空容器, ダイバータタイル, ICRF アンテナ, 追加リミター等も隠線 (陰面) 処理される．このため, 立体図を作成するときのデータ量は一般に膨大となる．

立体図の作成を指示する GUI 画面は次のようになっている．

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 32 に示す．

表 32: 立体図の作成を指示す入力データ詳細

	変数名	値	設定内容
1	j_rtlhd	$=0$	**立体図を作成しない**をクリックしたとき. 立体図を作成せず, 以下の 8 パラメータは無視される.
		$=1$	**真空容器壁面の走査**をクリックしたとき. 真空容器壁, ダイバータタイルに対するダイバータ磁力線の到達地点 (diverter footprints) の分布状況を走査する. 磁力線の立体図は作成しない.
		$=2$	**腹這いでカメラを構える**をクリックしたとき. 足を LHD の中心, 頭を磁気面に向けた腹這い姿勢でカメラを構え, 磁力線の立体図を作成する.
		$=3$	**立ってカメラを構える**をクリックしたとき. 立ってカメラを構え, 磁力線の立体図を作成する.
		$=4$	**真空容器の部分的切断**をクリックしたとき. 真空容器を部分的に切断して磁気面・磁力線の立体図を作成する.

カメラの構え方 (第 1 パラメータ j_rtlhd の値) により, 第 2 ～ 9 パラメータの設定値は意味合いが変化する.

カメラの構え方を指定するため, 次の 4 種の単位ベクトルを定義する.

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{n}_0 \\ \boldsymbol{n}_\phi \\ \boldsymbol{n}_r \\ \boldsymbol{n}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{視野中心へ向かう視線方向単位ベクトル} \\ \text{視野中心のトロイダル方向単位ベクトル} \\ \text{視野中心の径方向単位ベクトル} \\ z\ \text{方向単位ベクトル} \end{pmatrix} \tag{12}$$

4.10.1 真空容器壁, ダイバータタイルの走査 (j_rtlhd= 1 の場合)

スクリーンの横軸は $-\boldsymbol{n}_\phi$ 方向 (トロイダル角が減少する方向), スクリーンの縦軸 $\boldsymbol{n}_0 \times \boldsymbol{n}_\phi$ 方向とする. すなわち, インボード側のダイバータタイルを注視するときは正立画像となり, アウトボードタイルを注視するときは倒立画像となる. 磁力線による遮蔽を避けるため, 磁力線の立体図は作成しない. 第 2 パラメータ以下は, 真空容器壁, ダイバータタイルに対するダイバータ磁力線の到達地点 (diverter footprints) を連続的に走査することを前提に次のように定める. 視点は磁気軸と真空容器壁との中間位置に設定する. カメラはヘリカル回転座標系の上で固定する. この状態でトロイダル角を掃引すれば真空容器壁, ダイバータタイル全体を連続的に走査できる. 視点と視野の中心位置, および, 真空容器壁との関係は図 4.10.1 を見れば参考となる.

真空容器壁, ダイバータタイルの走査を行うためのカメラの構え方を指示する GUI 画面は次のようになっている.

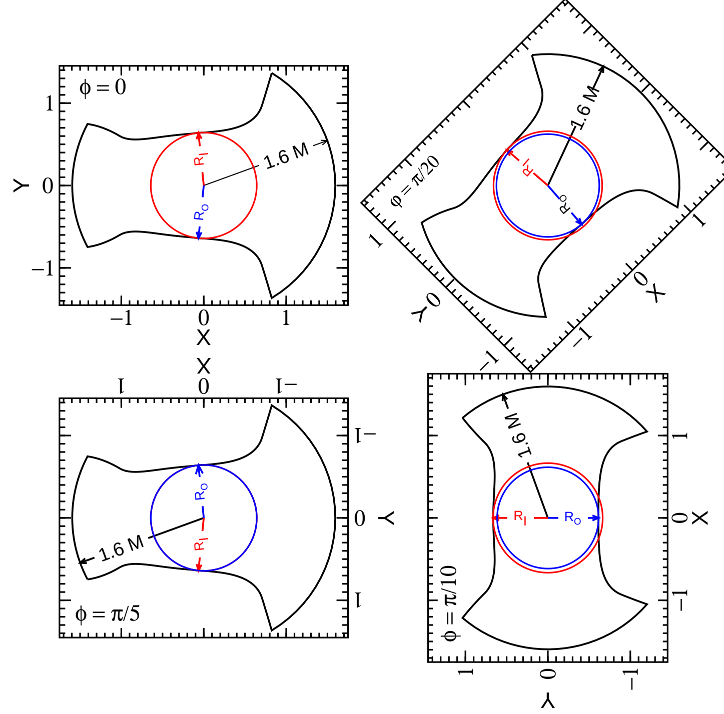


図 3: 回転ヘリカル座標 (X, Y, ϕ) と真空容器壁との関係

ϕ はトロイダル角を表し, X 軸は常に真空容器の長軸方向にある.
Y 軸は常に真空容器の短軸方向にあり, X 軸とは直交している.
LHD の磁場はトロイダル角 ϕ が 1 ヘリカルピッチ $(= \pi/5)$ 進むと元に戻るが, 回転ヘリカル座標は符号が反転する. 注意しなければならない.
真空容器トーラス小半径の内法 $(= 1.6\,\mathrm{m})$ を示す. また, ヘリカルコイルを埋め込む溝に対する基準小半径 $(= r_i,\ r_o)$ を赤色と青色とで示している.

$$r_o = \left[0.667 - 0.05\cos^2\left\{\frac{p(\phi - \phi_0) + \alpha \sin p(\phi - \phi_0)}{2}\right\}\right]\,\mathrm{m}$$

$$r_i = \left[0.667 - 0.05\cos^2\left\{\frac{p(\phi + \phi_0) + \alpha \sin p(\phi + \phi_0)}{2}\right\}\right]\,\mathrm{m}$$

ここで, $p\ (= 5)$ はヘリカルピッチ, $\phi_0\ (= \pi/10)$ はヘリカルコイルが赤道面上にくるトロイダル角, $\alpha\ (= 0.1)$ はヘリカルコイルのピッチ変調係数を示す.

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 33 に示す.

表 33: 真空容器壁, ダイバータタイルの走査を指示する入力データ詳細

	変数名	**値**	**設定内容**
2	ph_scn_in	走査開始トロイダル角 (度)	視点の先頭トロイダル角を指定する.
3	ph_scn_fn	走査終端トロイダル角 (度)	視点の終端トロイダル角を指定する.
4	ph_scn_bn	トロイダル角分割数 (個)	視点トロイダル角の分割数を指定する.
5	x_scn	視野中心 X 座標 (m)	視野中心の X 座標を指定する.
6	y_scn	視野中心 y 座標 (m)	視野中心の y 座標を指定する.
7	mu_scn(注 1)	視点移動割合	視点を磁気軸から真空容器壁側 (視野中心側) へ移動させる割合を指定する.
8	l_scrn	視点スクリーン間 (m)	視点とスクリーン間の距離を指定する. 通常のカメラ並みの 0.05 程度を設定すればよい.
9	vis_angl	視野最大角 (度)	立体図を作成する時の視野の最大角 (立体図の横軸方向) を指定する. 立体図縦軸方向視野の最大角は自動調整する.
10	dot_s(注 2)	切断面の描画とドットサイズ	見たままの立体図か切断面を示す立体図かを指定するとともに, 磁力線のドットサイズを指定する.

(注 1) : LHD の真空容器壁の断面はダンベル型 (亜鈴型) をしているため, 磁気軸からアウトボード側内壁を見ると影の部分 (立体図で表現されない内壁) が現れる. 影の部分を避けるには視点を真空容器壁に近づける必要がある.

(注 2) : 見たままの立体図の場合は, dot_s に正の数値, 切断面を示す立体図の場合は, dot_s に負の数値が設定される. 切断面の指定は次の規則に従う. 視点から, 視野中心へ向かう単位ベクトルを $\boldsymbol{n}_0$, 視野中心のトロイダル方向単位ベクトルを $\boldsymbol{n}_{\boldsymbol{\phi}}$, 視野中心の径方向単位ベクトルを $\boldsymbol{n}_{\boldsymbol{r}}$, z 方向 (鉛直方向) 単位ベクトルを $\boldsymbol{n}_z$ と表す.
トーラスを接線方向に見ていると判断できるとき, すなわち,

$$|\boldsymbol{n}_0 \cdot \boldsymbol{n}_{\boldsymbol{\phi}}| > 0.829 \text{ の場合.}$$

が成立すれば, 視野中心位置を通る子午面を切断面とする. そうではなく,
トーラスを見下ろし, あるいは見上げていると判断できるとき, すなわち,

$$|\boldsymbol{n}_0 \cdot \boldsymbol{n}_z| > 0.829 \text{ の場合.}$$

が成立すれば, 赤道面 ($z = 0$) を切断面とする.

上記以外は $r = \langle r_{\rm ax} \rangle$ の円筒面を切断面とする. ($\langle r_{\rm ax} \rangle$ は磁気軸の平均値)

描画される磁力線のドットの大きさは, dot_s の絶対値で指定する.

表 34: 立体図を描画する実際のドットサイズとパラメータ dot_s の値の関係

GUI 画面での指定	極大	大	中	小	より小	極小			
| dot_s|	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ドットサイズ (mm)	0.4	0.2	0.1	0.07	0.02	0.01	1	2	3

入力されたデータの具体例を表 35 に示す.

表 35: 真空容器壁, ダイバータタイルの走査を指示する入力データの具体例

入力例								
走査開始トロイダル角	**走査終端トロイダル角**	**トロイダル角分割数**	**視野中心 X 座標**	**視野中心 Y 座標**	**視点移動距離**	**視点スクリーン間**	**視野最大角**	**ドットサイズ**
0	72	12	-1.5	0	-0.1	0.05	40	2

4.10.2 腹這い姿勢でカメラを構えた磁力線立体図の作成 (j_rtlhd= 2 の場合)

LHD の真空容器の上部, および下部に設けられている観測孔 (U ポート, L ポート) から, 磁力線, 磁気面の立体図を作るときには腹這い姿勢になってカメラを構える必要がある. これに対応する磁力線, 磁気面の立体図を作成するときには j_rtlhd= 2 と指定すればよい. j_rtlhd= 2 の場合には, 立体図が描かれるスクリーンの横軸方向は $-\boldsymbol{n}_r \times \boldsymbol{n}_0$, スクリーンの縦軸方向は $\boldsymbol{n}_0 \times (\boldsymbol{n}_r \times \boldsymbol{n}_0)$ と設定される. スクリーンの縦軸はほぼ $\boldsymbol{n}_r$ 方向, 横軸は U ポート側から見たときはトロイダル角が増加する方向, L ポート側から見たときはトロイダル角が減少する方向となる. 立体図は 1 枚だけ作成する.

腹這い姿勢に構えたカメラでの立体図作成を指示する GUI 画面は次のようになっている.

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 36 に示す.

表 36: 腹這い姿勢に構えたカメラで立体図作成を指示する入力データ詳細

	変数名	値	設定内容
2	rtlhd_eyex	視点 x 座標 (m)	視点の x 座標を指定する.
3	rtlhd_eyey	視点 y 座標 (m)	視点の y 座標を指定する.
4	rtlhd_eyez	視点 z 座標 (m)	視点の z 座標を指定する.
5	rtlhd_cntx	視野中心 x 座標 (m)	視野中心の x 座標を指定する.
6	rtlhd_cnty	視野中心 y 座標 (m)	視野中心の y 座標を指定する.
7	rtlhd_cntz	視野中心 z 座標 (m)	視野中心の z 座標を指定する.
8	l_scrn(注 1)	視点スクリーン間 (m)	視点とスクリーン間の距離を指定する.
9	vis_angl	視野最大角 (度)	立体図を作成する時の視野の最大角度 (立体図の横軸方向) を指定する. 立体図縦軸方向視野の最大角は自動調整する.
10	dot_s(注 2)	切断面の描画とドットサイズ	見たままの立体図か切断面を示す立体図かを指定するとともに, 磁力線のドットサイズを指定する.

(注 1) : 真空容器内に視点を設定するときは, 通常のカメラ並みの 0.05 程度を l_scrn に設定すればよい. 計測装置によっては真空容器外に設置するものも数多い. このときは計測装置 (視点) の前方に真空容器の外壁が存在する (LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「 LHD_lines_of_force.exe」には, 真空容器に設けられているポート類の開口部まではデータとして組み込まれていない). その時でも, l_scrn を適当に設定し, 立体図を作成するスクリーン (フィルム) 位置を真空容器内に持ち込めば, 真空容器外から真空容器内の立体画像が作成可能となる. LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「 LHD_lines_of_force.exe」では, スクリーンと視点間に位置する構造物は画像化しない.

(注 2) : dot_s<0 のときは切断面を表示する. dot_s の詳細については表 34(50 頁) 参照のこと.

入力されたデータの具体例を表 37 に示す.

表 37: 腹這い姿勢に構えたカメラで立体図作成を指示する入力データの具体例

入力例								
視点の x 座標	**視点の y 座標**	**視点の z 座標**	**視野中心の x 座標**	**視野中心の y 座標**	**視野中心の z 座標**	**視点スクリーン間**	**視野最大角**	**ドットサイズ**
7.0772	1.3691	0.4749	2.6740	1.9339	-1.3955	2.2	10	2

4.10.3 立ってカメラを構えた場合の磁力線立体図の作成 (j_rtlhd$=3$ の場合)

スクリーンの横軸方向は $-\boldsymbol{n}_z \times \boldsymbol{n}_0$, スクリーンの縦軸方向は $\boldsymbol{n}_0 \times (\boldsymbol{n}_z \times \boldsymbol{n}_0)$ とする. すなわち, 縦軸はほぼ, 鉛直方向となる. O, I ポートから真空容器内を見た立体図の作成に適している. 立体図は 1 枚だけ作成する.

立った姿勢に構えたカメラでの立体図作成を指示する GUI 画面は次のようになっている.

立体図とカメラの構え方
○ 立体図を作成しない
○ 真空容器壁面の走査
○ 腹這いでカメラを構える
◉ 立ってカメラを構える
○ 真空容器の部分切断

視点座標(x) 視点座標(y) 視点座標(z)
視野中心座標(x) 視野中心座標(y) 視野中心座標(z)
視点〜スクリーン間の距離 (m) 視野最大角 (度) 参考
☑ 断面を表示する 磁力線ドットサイズ: ○ 極大 ○ 大 ◉ 中 ○ 小 ○ より小 ○ 極小

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 38 に示す.

表 38: 立った姿勢に構たカメラで立体図作成を指示する入力データ詳細

	変数名	**値**	**設定内容**
2	rtlhd_eyex	視点 x 座標 (m)	視点の x 座標を指定する.
3	rtlhd_eyey	視点 y 座標 (m)	視点の y 座標を指定する.
4	rtlhd_eyez	視点 z 座標 (m)	視点の z 座標を指定する.
5	rtlhd_cntx	視野中心 x 座標 (m)	視野中心の x 座標を指定する.
6	rtlhd_cnty	視野中心 y 座標 (m)	視野中心の y 座標を指定する.
7	rtlhd_cntz	視野中心 z 座標 (m)	視野中心の z 座標を指定する.
8	l_scrn(注 1)	視点スクリーン間 (m)	視点とスクリーン間の距離を指定する.
9	vis_angl	視野最大角 (度)	立体図を作成する時の視野の最大角度 (立体図の横軸方向) を指定する. 立体図縦軸方向視野の最大角は自動調整する.
10	dot_s(注 2)	dot_s< 0 のときは切断面を表示する.	見たままの立体図か切断面を示す立体図かを指定するとともに, 磁力線のドットサイズを指定する.

(注 1) : l_scrn については, 51 ページ参照のこと.

(注 2) : dot_s< 0 のときは切断面を表示する. dot_s の詳細については表 34(50 頁) 参照のこと.

入力されたデータの具体例を表 39 に示す.

表 39: 立った姿勢に構えたカメラで立体図作成を指示する入力データの具体例

入力例								
視点の x 座標	**視点の y 座標**	**視点の z 座標**	**視野中心の x 座標**	**視野中心の y 座標**	**視野中心の z 座標**	**視点スクリーン間**	**視野最大角**	**ドットサイズ**
7.0772	1.3691	0.4749	2.6740	1.9339	−1.3955	2.2	10	2

4.10.4 真空容器を部分的に切断した磁力線立体図の作成 (j_rtlhd= 4 の場合)

LHD の磁気面, 磁力線構造を大局的に把握するには, 真空容器を部分的に切断した磁力線立体図が有効である. j_rtlhd= 4 の場合はこの磁力線立体図を作成するためのパラメータ設定を行う. 真空容器壁の切断はトロイダル角が phcr1 と phcr2 とで行うとする. 視点のトロイダル角は取り除かれた部分の中央 (phcr1 + phcr2)/2 に設定し, (r, z) はパラメータで指定する. 視野の中心はトロイダル角が (phcr1 + phcr2)/2 となる磁気軸上に設定する. 真空容器内の磁力線は奥まで見通せるので描画する磁力線の上限, 下限も別途 (phcr0, phcr3) 設定する.

真空容器を部分的に切断した磁力線立体図の作成を指示する GUI 画面は次のようになっている.

立体図とカメラの構え方
○ 立体図を作成しない
○ 真空容器壁面の走査
○ 腹這いでカメラを構える
○ 立ってカメラを構える
◉ 真空容器の部分切断
トロイダル角下限1 トロイダル角下限2 トロイダル角上限1
トロイダル角上限2 視点座標(r) 視点座標(z)
視点〜スクリーン間の距離 (m) 視野最大角 (度) 参考
☑ 断面を表示する 磁力線ドットサイズ: ○ 極大 ○ 大 ◉ 中 ○ 小 ○ より小 ○ 極小

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 40 に示す.

表 40: 真空容器を部分的に切断した磁力線立体図の作成を指示する入力データ詳細

	変数名	値	設定内容
2	phcr0	トロイダル角下限 1 (度)	描画する磁力線のトロイダル角下限を指定.
3	phcr1	トロイダル角下限 2 (度)	描画する真空容器のトロイダル角下限を指定.
4	phcr2	トロイダル角上限 2 (度)	描画する真空容器のトロイダル角上限を指定.
5	phcr3	トロイダル角上限 1 (度)	描画する磁力線のトロイダル角上限を指定.
6	r_eye	視点 r 座標 (m)	視点の r 座標を指定する.
7	z_eye	視点 z 座標 (m)	視点の z 座標を指定する.
8	l_scrn(注 1)	視点スクリーン間 (m)	視点とスクリーン間の距離を指定する.
9	vis_angl	視野最大角 (度)	立体図を作成する時の視野の最大角度 (立体図の横軸方向) を指定する. 立体図縦軸方向視野の最大角は自動調整する.
10	dot_s(注 2)	dot_s< 0 のときは切断面を表示する.	見たままの立体図か切断面を示す立体図かを指定するとともに, 磁力線のドットサイズを指定する.

(注 1) : l_scrn については, 51 ページ参照のこと.

(注 2) : dot_s< 0 のときは切断面を表示する. dot_s の詳細については表 34(50 頁) 参照のこと.

入力されたデータの具体例を表 41 に示す.

表 41: 真空容器を部分的に切断した磁力線立体図の作成を指示する入力データの具体例

入力例								
磁力線トロイダル角下限	**真空容器トロイダル角下限**	**真空容器トロイダル角上限**	**磁力線トロイダル角上限**	**視点 r 座標**	**視点 z 座標**	**視点スクリーン間**	**視野最大角**	**ドットサイズ**
-3	18	72	108	10	7.5	0.05	50	3

4.11 立体図に表示する構造物と磁力線の指定 (第 12 データ)

立体図に表示する構造物の指定と, 立体図に磁力線を描画するかどうかを指定する. GUI 画面は次のようになっている.

立体図に表示する構造物と磁力線
☑ 真空容器 ☑ リミター ☐ ヘリカルコイル ☐ ヘリカルコイル容器
☐ 垂直磁場コイル ☐ 磁気島コイル ☑ 磁力線

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 42 に示す.

表 42: 立体図に表示する構造物と磁力線を指示する入力データ詳細

	変数名	**値**	**設定内容**
1	swtch_vcvs	= 0	**真空容器**をクリックしないとき. 真空容器壁を立体図に書き込まない.
		= 1	**真空容器**をクリックしたとき. 真空容器壁を立体図に書き込む.
2	swtch_lmtr	= 0	**リミター**をクリックしないとき. リミターを立体図に書き込まない.
		= 1	**リミター**をクリックしたとき. リミターを立体図に書き込む.
3	swtch_hlc	= 0	**ヘリカルコイル**をクリックしないとき. ヘリカルコイル超伝導線を立体図に書き込まない.
		= 1	**ヘリカルコイル**をクリックしたとき. ヘリカルコイル超伝導線を立体図に書き込む.
4	swtch_hlvc	= 0	**ヘリカルコイル容器**をクリックしないとき. ヘリカルコイル容器を立体図に書き込まない.
		= 1	**ヘリカルコイル容器**をクリックしたとき. ヘリカルコイル容器を立体図に書き込む.
5	swtch_vtc	= 0	**垂直磁場コイル**をクリックしないとき. 垂直磁場コイルを立体図に書き込まない.

前ページ からの続き

	変数名	値	設定内容
		= 1	**垂直磁場コイル**をクリックしたとき．垂直磁場コイルを立体図に書き込む.
6	swtch_lid	= 0	**磁気島コイル**をクリックしないとき． 磁気島コイル (LID コイル) を立体図に書き込まない.
		= 1	**磁気島コイル**をクリックしたとき．磁気島コイル (LID コイル) を立体図に書き込む.
7	swtch_lines	= 0	**磁力線**をクリックしないとき．磁力線を立体図に書き込まない.
		= 1	**磁力線**をクリックしたとき．磁力線を立体図に書き込む.

入力されたデータの具体例を表 43 に示す.

表 43: 立体図に表示する構造物と磁力線の指示する入力データの具体例

入力例						
真空容器壁	**リミター**	**ヘリカルコイル超伝導線**	**ヘリカルコイル容器**	**垂直磁場コイル容器**	**磁気島コイル**	**磁力線**
1	1	0	0	0	0	1

4.12 磁力線追跡停止の指定 (第 13 データ)

磁力線追跡停止の条件を指定をする．磁力線追跡は回転ヘリカル座標系で表した位置座標 (X, Y) が,

$$|X| > 2\,\mathrm{m}, \text{ または } |Y| > 1.4\,\mathrm{m}$$

を満たせば必ず停止する．磁力線はそこに到達する以前に, 真空容器壁を貫通し, 真空容器内構造物 (リミター, あるいは ICRF アンテナ等) を貫通する場合もあり得る．真空容器内構造物に衝突した時点, あるいは真空容器壁を貫通した時点で 磁力線追跡を停止させるかどうかを指定する．磁力線追跡を停止するしないにかかわらず, リミター上および真空容器壁上には通過地点 (diverter footprints) を必ず刻印する.

磁力線追跡停止の条件を指定する GUI 画面は次のようになっている.

磁力線追跡停止 □リミター □真空容器

この GUI 画面で設定されるデータの詳細を表 44 に示す.

表 44: 磁力線追跡停止の条件を指定する入力データの詳細

	変数名	値	設定内容
1	j_lmtr_stp	= 0 = 1	**リミター**をクリックしたとき. 磁力線はリミターで停止する. **リミター**をクリックしないとき. 磁力線はリミターを貫通し, 停止しない.
2	j_vcvs_stp	= 0 = 1	**真空容器**をクリックしたとき. 磁力線は真空容器壁で停止する. **真空容器**をクリックしないとき. 磁力線は真空容器壁を貫通し, 停止しない.

入力されたデータの具体例を表 45 に示す.

表 45: 磁力線追跡停止の条件を指定する入力データの具体例

入力例	
リミターでの磁力線の停止または通過の指定	**真空容器壁での磁力線の停止または通過の指定**
1	1

4.13 コメント (第 14 データ)

図に書き込む任意コメントを指定する.

コメント

	変数名	値	設定内容
1	cmnt2	’コメント’	図に書き込む任意のコメント. コメントは必ずアポストロフィーで囲むこと.

入力例
コメント
’SAMPLE DATA #2’

4.14 PNG 出力 (ps ファイルの png ファイルへの変換)

ps ファイルに出力された図を png ファイルに変換・出力する場合に指定する. 作成される png ファイルは ps ファイル の拡張子を .png に変更し, ps ファイルのページ番号順に通し番号をファイル名に付加する.

☑ PNG 出力 300 (DPI)

	値	設定内容
1	解像度 (DPI)	画像ファイルの解像度 (デフォルトは 300DPI).

※画像の縦横は, おおよそＡ４用紙横に収まるサイズ (縦 2550pixel, 横 3300pixcel) となります.

入力例
解像度
300

入力データは以上で完結する.

5 数値計算例

この節は「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe による数値計算結果を述べる.

磁力線結合長 L_{cnl} に基づく磁力線の色分けは表 46 のように行う.

表 46: 磁力線結合長 L_{cnl} に基づく磁力線の色分け

L_{cnl}	$\leq$	$cnlmnd \times 24.5\,\mathrm{m}$ ($=$ $cnlmnd$ toroidal turn)	プロットせず
L_{cnl}	$\leq$	$24.5\,\mathrm{m}$ (=1 toroidal turn)	赤: RGB=(1,0,0)
L_{cnl}	$\leq$	$49.0\,\mathrm{m}$ (=2 toroidal turn)	黄: RGB=(1,1,0)
L_{cnl}	$\leq$	$122.5\,\mathrm{m}$ ($=5$ toroidal turn)	緑: RGB=(0,1,0)
L_{cnl}	$\leq$	$245.0\,\mathrm{m}$ ($=10$ toroidal turn)	水色: RGB=(0,1,1)
L_{cnl}	$\leq$	$mtn \times 24.5\,\mathrm{m}$ ($=$ mtn toroidal turn)	青色: RGB=(0,0,1)
L_{cnl}	$>$	$mtn \times 24.5\,\mathrm{m}$ ($=$ mtn toroidal turn)	鮮紅色: RGB=(1,0,1)
磁気面	:		ドットサイズ = 0.7 mm, 鮮紅色: RGB=(1,0,1)

パラメータ $cnlmnd$ については 40 頁, パラメータ mtn については**??** 頁を参照すること. 計算結果は, 磁力線ダイバータチャート, 子午面断面磁力線貫通図, 任意断面磁力線貫通図, 磁力線立体図の順で作成される.

- 磁力線ダイバータチャート
  LHD の真空容器は大半径 3.9 m, 小半径 1.6 m の円環型 (ドーナツ型) を基本としている. 当プログラムは真空容器壁から 0.15 m 内側, すなわち, 小半径 1.45 m の円環型表面でのダイバータ磁力線痕 (diverter footprints) を示す. 横軸はトロイダル角, 縦軸は方位角を示す. j_hl_prd= 1 と設定されているとき (41 頁参照) 横軸は 2 ヘリカルピッチ ($0 \leq \phi \leq 2\pi/5$), それ以外はトーラス一周 ($0 \leq \phi \leq 2\pi$) が設定される.
- 子午面断面および任意断面での磁力線貫通図, 磁力線立体図の作図条件は入力データで設定する.

5.1 ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析

LHD の代表的磁場配位の一つとして, ICRF 長時間放電 (ショット番号 #53754) を実現した配位を取り上げる. この放電では磁気軸掃引モードを採用しているので, 時刻 $t = 360\,\mathrm{sec}$ におけるコイル電流値での磁力線・磁気面の解析結果を示す. コイル電流値は下記のようになっていた.

表 47: ICRF 長時間放電 (ショット番号 #53754) の $t = 360\,\mathrm{sec}$ におけるコイル電流値

T(SEC)	H_O (A)	H_M (A)	H_I (A)	OV (A)	IS (A)	IV (A)
360	11071	11062	11073	−17630	−39654	98715

5.1.1 ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析—case(1)

まず最初に, LHD 磁場が連続巻きヘリカルコイルで生成されていることを最も特徴的に示す磁力線画像を示す. そのために, 真空容器壁を部分的に切断して, カオス磁力線, ダイバータレッグ, ダイバータタイルの関係を図示 (図 10, 11) する. 「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe の GUI (8 頁参照) が作成する入力データ (fort.50) は次のようになる.

表 48: ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析—case(1) のデータファイル fort.50

ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析—case(1) の入力データファイル fort.50

```
1 1 −300 3 0 18.0 360.0 7.0 1 './icrf8_cut' ## 新規/図形化処理, cad data, cad 出力ステップ幅, 再描画間隔, 損突粒子のみ (1)/全粒子 (0), phi0, phi1, ドットサイズ (mm), 面 (0)/線 (1) ファイル名 (接辞名)
11071, 11062, 11073, −17630, −3965.4, 9871.5, 0.0, 100000.0, ' #53754, T=360 SEC, RAX=3.6865 M'
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0
## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) と公称値 / lid_upper(A·T) / lid_lower(A·T) / dividing points
0.0, 0.0, 0.0, 0, 0.0
## LID ヘッド位置, 最深部 r, 最浅部 r, 分割数, 図面の最大水平距離
11, 0, 1, 0.0, 0.07, 0.07, 0, 0.0, 0.0, 0.0, ''
## ダイバータタイルの有無, アーマタイルの有無, ICRF アンテナの有無, 3.5UL 振り角度, 4.5UL 後退量, 7.5UL 後退量, 追加リミターの有無とデータファイル名
20, 0
## 最大トーラス周回数と追跡方向 (−1: −B 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)
3
## 出発点座標系 (0:回転ヘリカル座標系, 1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)
200, 5, 7, 10, 0
## 径方向分割数, ポロイダル方向分割数, トロイダル方向分割数 (1 ヘリカルセクション), 磁気面枚数, カオス磁気面領域の磁気島のみプロット
0.5,
## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数)
0, 27.0, 3, 1, 0
```

前ページ からの続き

ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析—case(1) のデータ

子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 (= 1 : 仮定する), 詳細図 (1)/通常 (0)
4, 0.1, 2.5
磁場強度あるいは視線と磁力線交差角分布に対する等高線図プロットの有無とそのためのデータ
1 −1.233, −3.4589, 2.357, −1.233, −3.4589, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 3.2
任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心．最大視野
4, 54.0, 72.0, 108.0, 126.0, 3.7, 8.0, 0.01, 22.0, 2
立体図の有無と視点, 視野間中心，視点とスクリーン位置までの距離， 視野角 (度), ドットサイズ
1, 1, 1, 1, 1, 0, 1
立体図に示す構造物と磁力線 (真空容器，リミター，ヘリカルコイルと容器，垂直磁場コイル，磁気島コイル，磁力線)
1, 1
リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定
'ICRF LONG PULSE'
計算結果に書き込む任意のコメント．データの終了

磁気軸位置と磁気軸上磁場強度は次式で与えられることが示される．

$$
\begin{array}{llll}
a_1 = -0.22799 \;, & a_3 = -0.60418 \times 10^{-4} \;, & b_1 = 0.1885892 \;, & b_3 = 0.1226752 \times 10^{-3} \;, \\
\langle r_{\rm ax} \rangle = 3.692 \;, & \delta r_{\rm ax} = 0.39588 \times 10^{-1} \;, & \langle z_{\rm ax} \rangle = -.6 \times 10^{-18} \;, & \delta z_{\rm ax} = 0.39222 \times 10^{-1} \\
\langle B_{\rm ax} \rangle = 2.695 \;, & \delta B_{\rm ax} = 0.11862 \times 10^{-1} \;, & \iota_{\rm ax}/2\pi = 0.340 \;, & (\text{単位: SI 単位系}) \;.
\end{array}
$$

磁力線ダイバータチャート, 子午面伝面磁力線貫通図, 任意断面磁力線貫通図, 磁力線立体図を以下に示す．

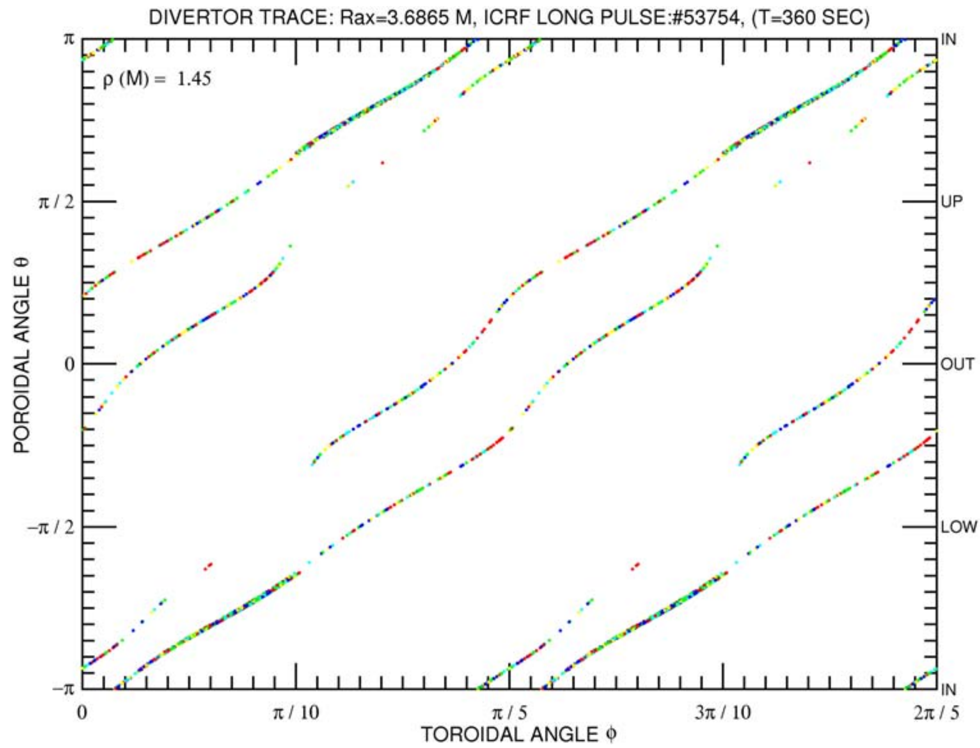


図 4: ダイバータチャート. 横軸はトロイダル角, 縦軸はポロイダル角を示す. ダイバータ磁力線の結合長に応じてダイバータ痕 (diverter footprints) が色分け (58 頁参照) されている.

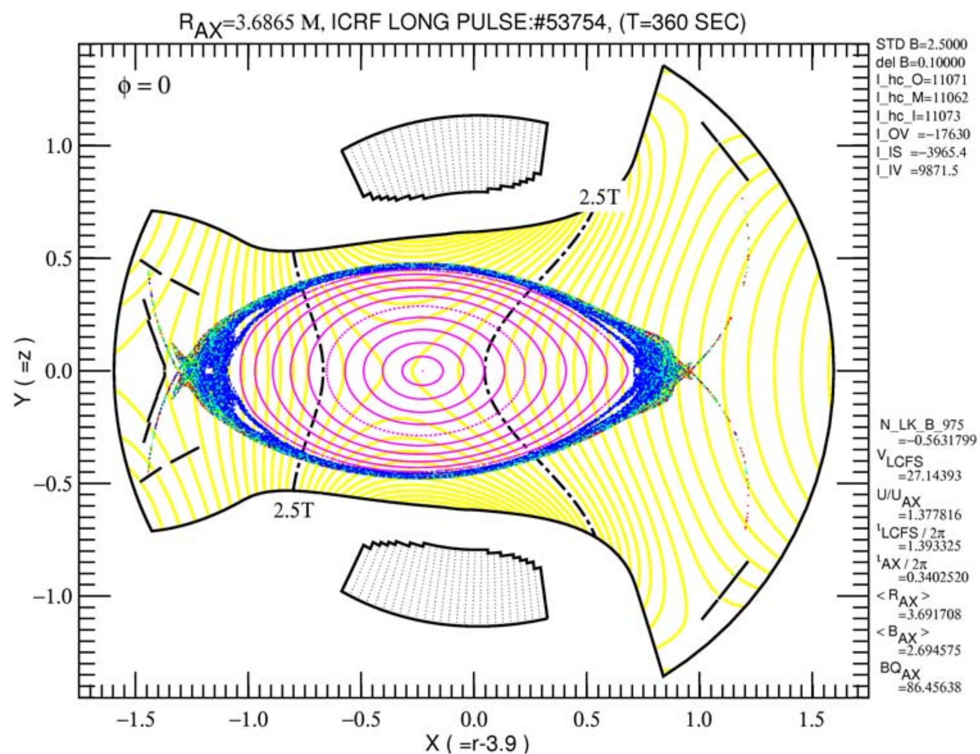


図 5: 子午面 $\phi = 0$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸. ダイバータ磁力線は結合長に応じて色分け (58 頁参照) されている. 磁気面は鮮紅色のドットで記されている.

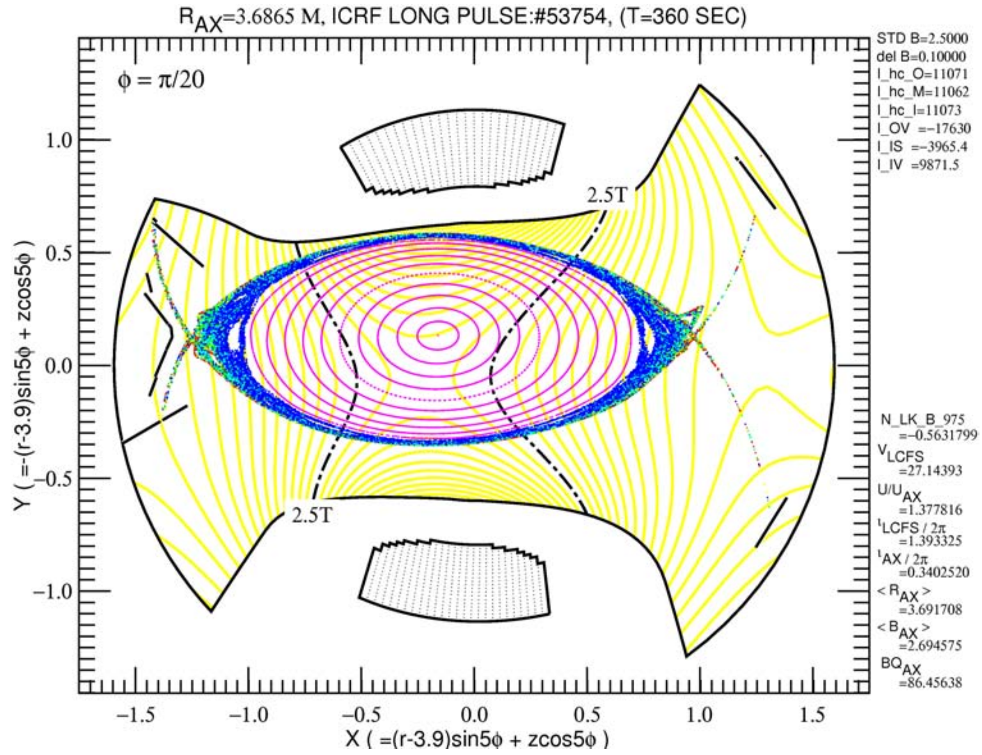


図 6: 子午面 $\phi = \pi/20$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

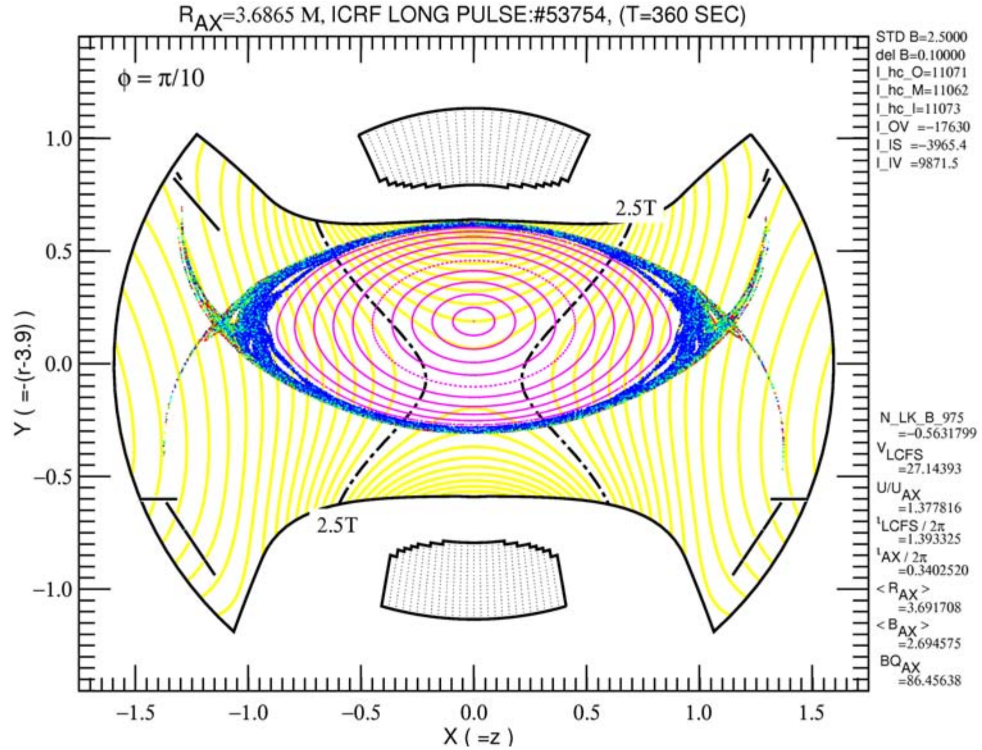


図 7: 子午面 $\phi = \pi/10$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

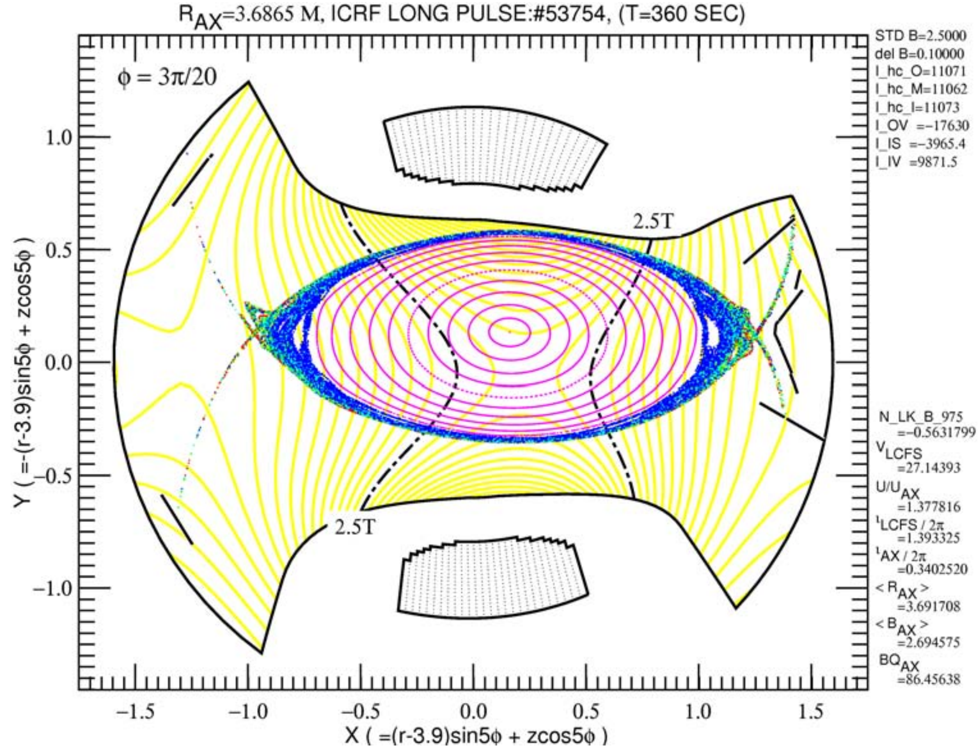


図 8: 子午面 $\phi = 3\pi/20$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

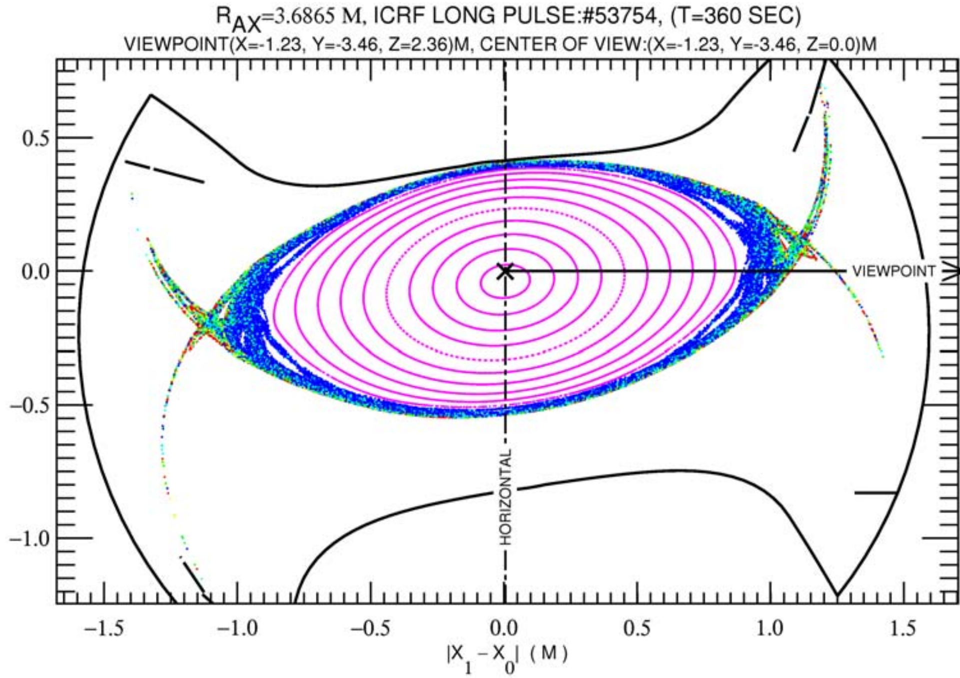


図 9: U ポートに設置された ccd カメラ位置 $((x, y, z) = (-1.233, -3.4589, 2.357)\,\mathrm{m}\ )$ から真下を見下ろす視線が定める子午面を通過する磁力線貫通図

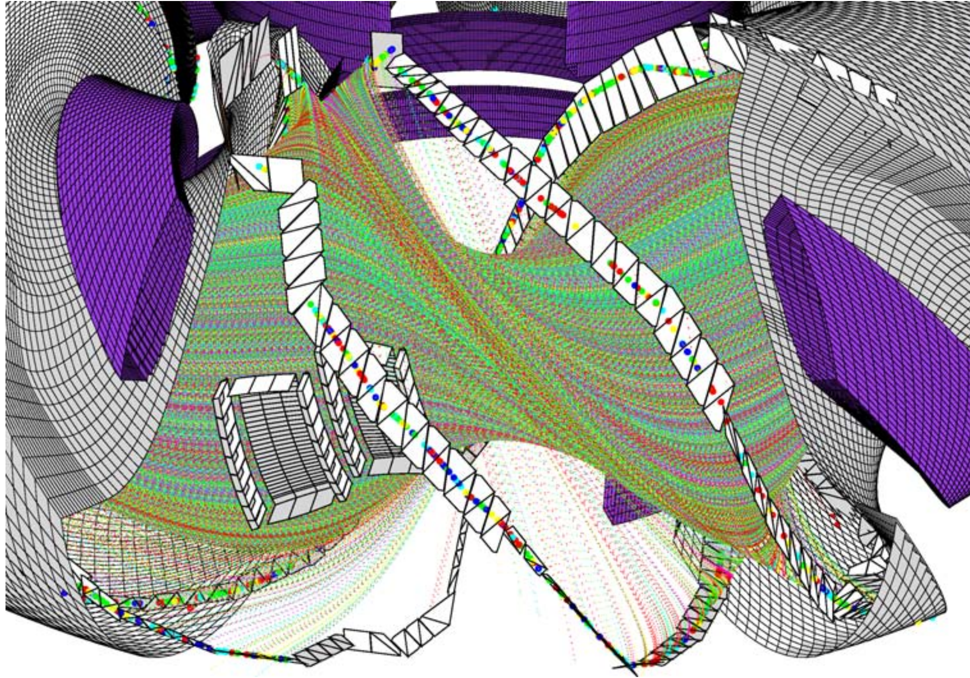


図 10: 真空容器壁を $7\pi/20 \le \phi \le 11\pi/20$ の範囲で切除してカオス磁力線の立体図を示す．ダイバータタイルと ICRF アンテナも示されている．コイル電流は表 47 に示され, ICRF 長時間放電 (ショット番号#53754, $t = 360\,\mathrm{sec}$) のときの値である．

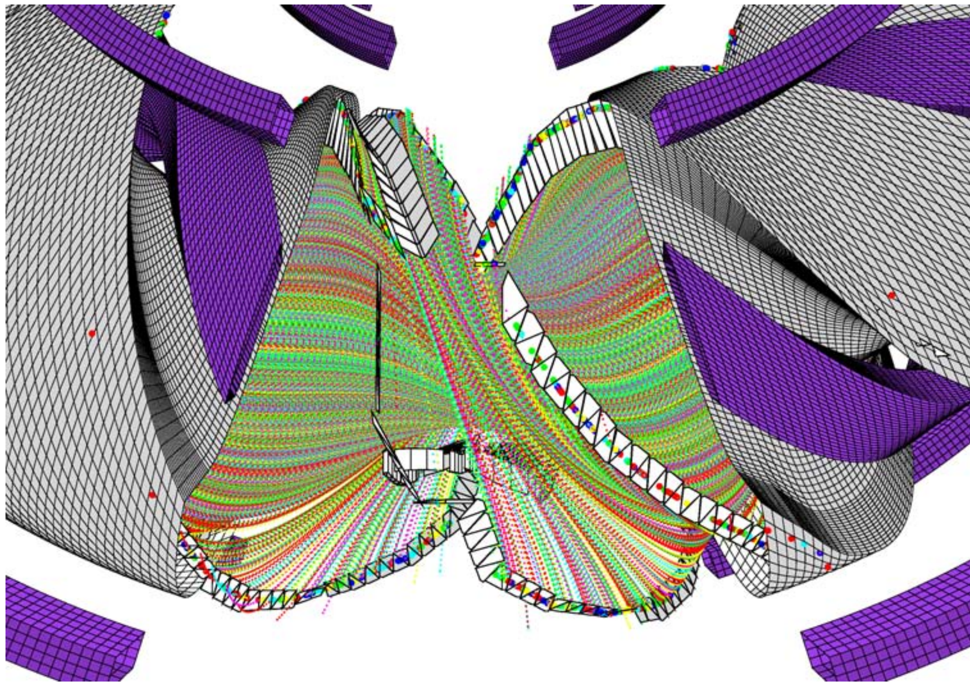


図 11: 磁力線追跡の出発地点を稠密に設定すればダイバータレッグも明瞭に描画される．LHD における高性能プラズマ保持を実現しているカオス磁力線とダイバータレッグの興味深い構造が見える．

5.1.2 ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析—case(2)

LHD のダイバータタイルは強制水冷され, その除熱能力は 3MW の ICRF 定常加熱実験に耐えることができる (設計値). そのため, ICRF 長時間放電の実現にはダイバータ磁力線がダイバータタイルに受け止められていることが重要である. このことを確認しよう.「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe の GUI (8 頁参照) では次のような入力データを (fort.50) を作成する.

表 49: ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析—case(2) のデータ

ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析—case(2) のデータファイル fort.50

```
1 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 1 './icrf8_diverter'
## 新規/図形化処理, cad data, cad 出力ステップ幅, 再描画間隔, 損突粒子のみ (1)/全粒子 (0), phi0, phi1, ドットサイズ (mm), 面 (0)/線 (1) ファイル名 (接辞名)
11071, 11062, 11073, −17630, −3965.4, 9871.5, 0.0, 100000.0, ' #53754, T=360 SEC, RAX=3.6865 M'
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0
## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) とコメント / lid_upper(A·T) / lid_lower(A·T) / dividing points
0.0, 0.0, 0.0, 0, 0.0
## LID ヘッド位置, 最深部 r, 最浅部 r, 分割数, 図面の最大水平距離
11, 0, 1, 0.0, 0.07, 0.07, 0, 0.0, 0.0, 0.0, ''
## ダイバータタイルの有無, アーマタイルの有無, ICRF アンテナの有無, 3.5UL 振り角度, 4.5UL 後退量, 7.5UL 後退量, 追加リミターの有無とデータファイル名
20, 0
## 最大トーラス周回数と追跡方向 (−1: −B 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)
3
## 出発点座標系 (0:回転ヘリカル座標系, 1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)
1000(注 1) , 31, 7, 10, 0
## 径方向分割数, ポロイダル方向分割数, トロイダル方向分割数 (1 ヘリカルセクション), 磁気面枚数, カオス磁気面領域の磁気島のみプロット
0.5,
## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数), 磁気面領域描画の有無
0.0, 0.0, 0, 1, 0
## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 ( = 1 : 仮定する), 詳細図 (1)/通常 (0)
4, 0.1, 2.5
## 磁場強度あるいは視線と磁力線交差角分布に対する等高線図プロットの有無とそのためのデータ
0, −1.233, −3.4589, 2.357, −1.233, −3.4589, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 3.2
## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心. 最大視野
1(注 2) 0.0, 72.0, 12.0, −1.6, 0.0, 0.1, 0.1, 32.0, 1
## 立体図の有無と視点, 視野間中心, 視点とスクリーン位置までの距離, 視野角 (度), ドットサイズ
1, 1, 1, 1, 1, 0, 0(注 4)
## 立体図に示す構造物と磁力線 (真空容器, リミター, ヘリカルコイルと容器, 垂直磁場コイル, 磁気島コイル, 磁力線)
1, 1
## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定
' ICRF LONG PULSE'
```

前ページ からの続き

ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析—case(2) のデータファイル fort.50

計算結果に書き込む任意のコメント．データの終了

前小節—case(1)—のデータ (表 48) との違いは赤で示されている部分である．
(注 1)： ダイバータ痕を稠密に描くために出発点を稠密に設定した．
(注 2)： 真空容器壁, ダイバータタイルの走査と指定した．
(注 3)： 磁力線自身は立体図に含ませない．

ダイバータ磁力線が衝突した地点について, 真空容器壁, ダイバータタイルを走査した結果を図 12, 13 に示す．

図 12 の $\phi = \pi/10$ の L ポート近辺, 図 13 の $\phi = 3\pi/10$ の U ポート近辺では, ダイバータ磁力線が真空容器壁に衝突しているが, 実際にはこの部分に大きな観測孔 (L ポート,U ポート) が存在し, ダイバータタイルはそこで垂直方向に差し込まれている．この図だけからは, この領域におけるダイバータ磁力線とダイバータタイルの関係は読み取れない．また, $\phi = \pi/30$,$\phi = 4\pi/30$ 近辺にダイバータ磁力線の貫通しないダイバータタイルが存在するのは．ダイバータ磁力線がダイバータタイルにほぼ平行に走行しているためである．

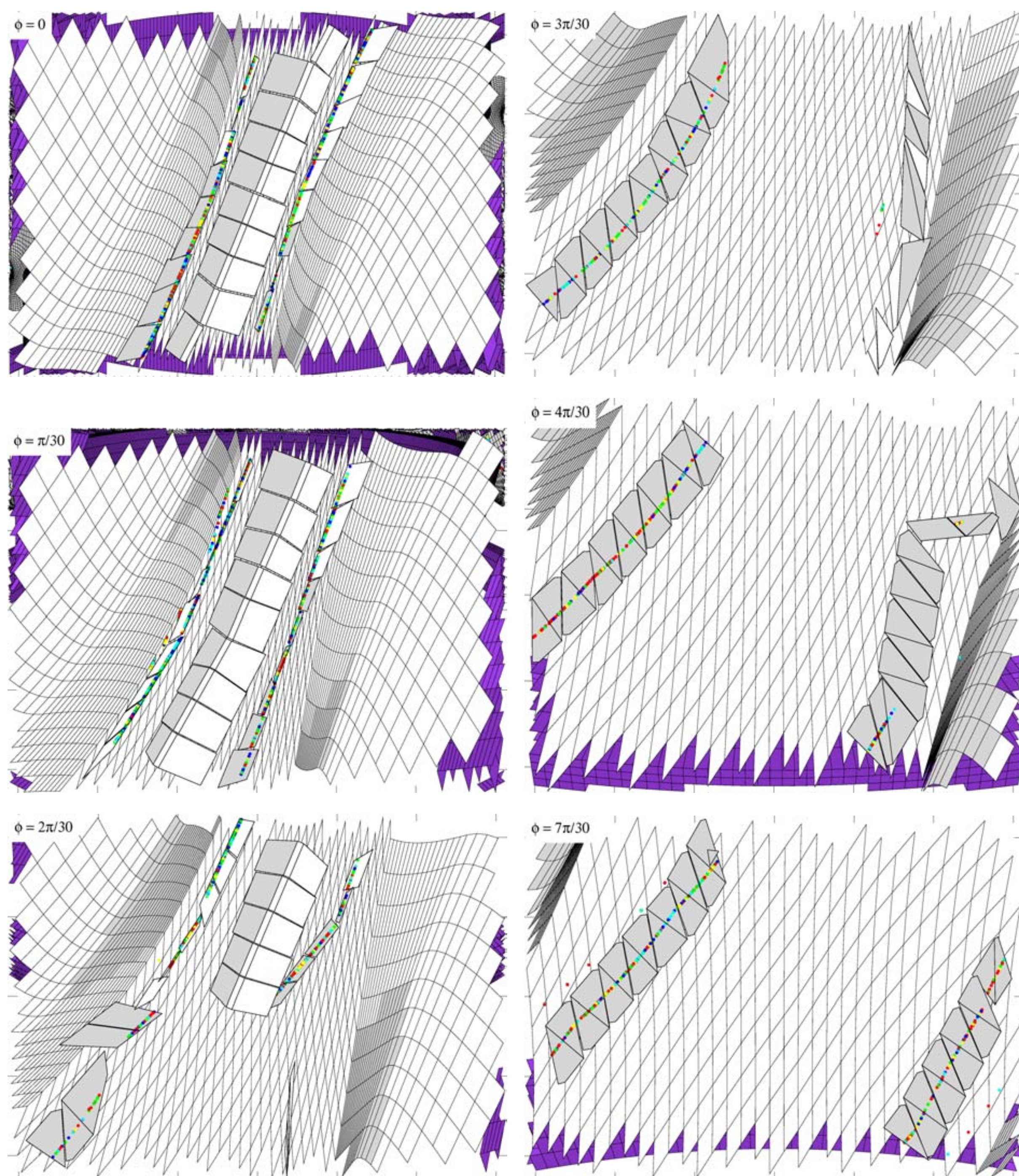


図 12: ICRF 長時間放電時 ($t = 360\,\mathrm{sec}$) のダイバータ痕 (diverter footprints) — その 1

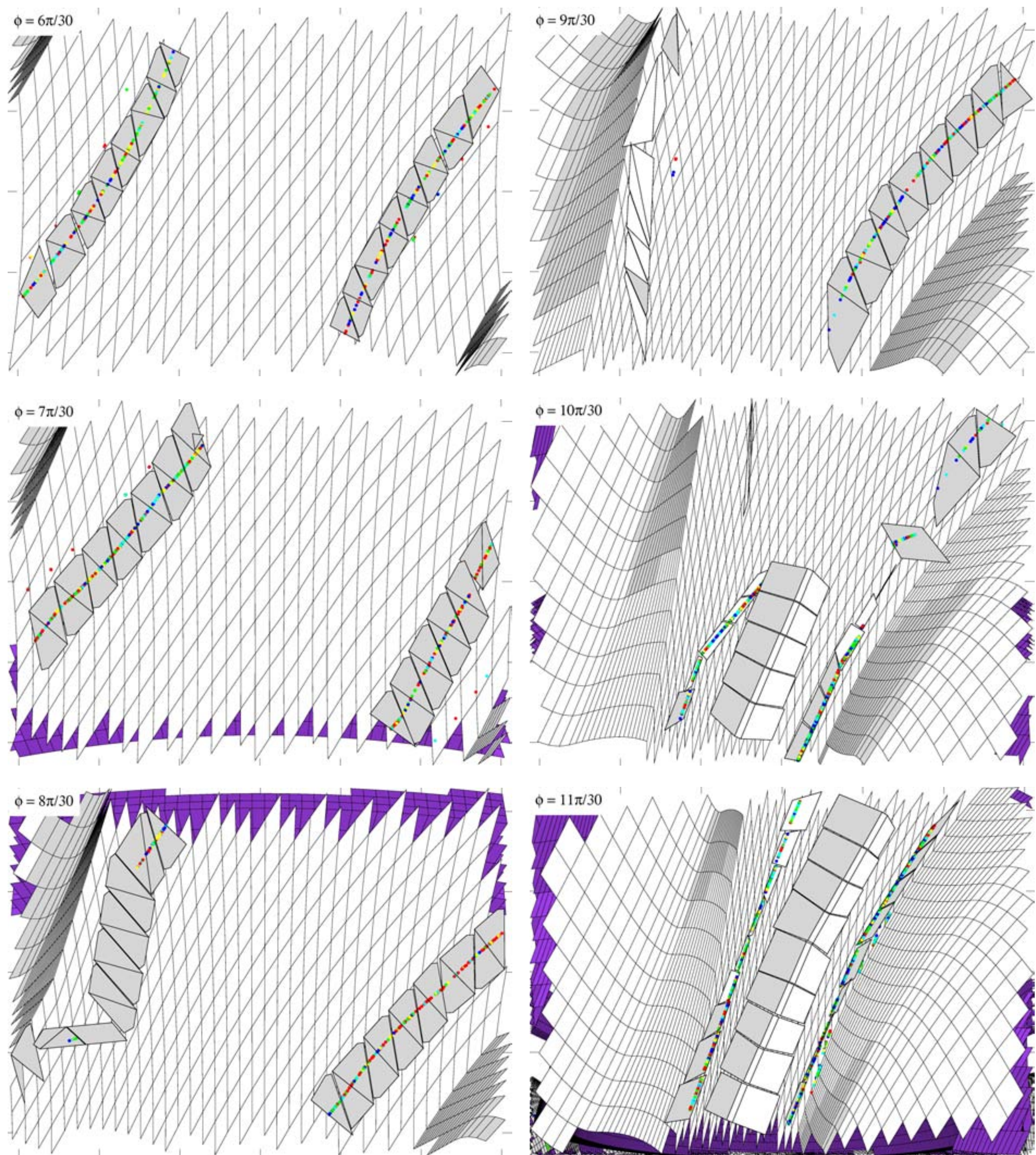


図 13: ICRF 長時間放電時 ($t = 360\,\mathrm{sec}$) のダイバータ痕 (diverter footprints) — その 2

5.2 LHD の標準磁場配位 ($R_{\rm ax}=3.6\,{\rm m}$) の磁力線・磁気面構造解析例

磁気軸位置を装置中心位置 ($r_0=3.9\,{\rm m}$) よりも, 0.3 m 内側に寄せた配位 ($R_{\rm ax}=3.6\,{\rm m}$ 配位) は, これまでの LHD 実験では最高のプラズマ閉じ込め性能を実現してきた. このため, $R_{\rm ax}=3.6\,{\rm m}$ 配位は LHD の標準磁場配位の一つ (内寄せ標準磁場配位) とれている. 磁気軸上磁場強度が 2.75 T ($B_{\rm ax}=2.75\,{\rm T}$), $\gamma=1.254$ となる $R_{\rm ax}=3.6\,{\rm m}$ 配位を実現するコイル電流値は次で与えられる.

表 50: $R_{\rm ax}=3.6\,{\rm m}$, $B_{\rm ax}=2.75\,{\rm T}$ 配位のコイル電流値

$R_{\rm ax}$	$B_{\rm ax}$	H_O (A)	H_M (A)	H_I (A)	OV (A)	IS (A)	IV (A)
3.6 m	2.75 T	11000	11000	11000	−17967	−3007	11229

磁気軸位置, および磁気軸上磁場強度は次式で与えられることが示される (?? 頁 (??) 式参照).

$$
\begin{array}{llll}
a_1=-0.3352\ , & a_3=-0.479\times10^{-3}\ , & b_1=0.2638131\ , & b_3=0.6204\times10^{-3}\ , \\
\langle r_{\rm ax}\rangle=3.600\ , & \delta r_{\rm ax}=0.72486\times10^{-1}\ , & \langle z_{\rm ax}\rangle=-.7\times10^{-18}\ , & \delta z_{\rm ax}=0.703\times10^{-1}\ , \\
\langle B_{\rm ax}\rangle=2.736\ , & \delta B_{\rm ax}=0.94933\times10^{-1}\ , & \iota_{\rm ax}/2\pi=0.373\ , & (\text{単位: SI 単位系})\ .
\end{array}
$$

内寄せ標準磁場配位 ($R_{\rm ax}=3.6\,{\rm m}$ 配位) の特徴は次のようになる.

- 最外殻磁気面での回転変換 $\iota_{\rm LCFS}/2\pi$ が黄金分割比となっている [3].

$$
\frac{\iota_{\rm LCFS}}{2\pi}\simeq\frac{1+\sqrt{5}}{2}=1.61803398874989\cdots\ ,
$$

- 最外殻磁気面の外側を取り囲むカオス磁力線領域の厚みが極めて薄い. これは, 最外殻磁気面での回転変換 $\iota_{\rm LCFS}/2\pi$ が黄金分割比となっていることと関係している可能性がある. 黄金分割比は有理数からは最も遠い無理数の一つである.

- 最外殻磁気面の囲む体積 $V_{\rm LCFS}$ はほぼ最大と思われる.

$$
V_{\rm LCFS}\simeq 30.0\,{\rm m}^3
$$

  カオス磁力線領域の体積は $V_{\rm chaos}\simeq 2.1\,{\rm m}^3$ である [3].

- ダイバータ磁力線を構成するヒゲ磁力線のやや顕著な分裂が I ポートの近辺に出現する. ダイバータ痕 (diverter footprints) の一部はダイバータタイルを逸れて真空容器壁に達している.

LHD は磁場の 3 重構造 (磁気面領域, カオス磁力線領域, ダイバータレッグ) で高性能プラズマ保持を実現する. 炉心の高温プラズマは磁気面領域で保持する. それを取り囲むカオス磁力線領域は磁力線に規則性がないため, MHD 不安定を引き起こす荷電分離は直ちに中和し, プラズマの崩壊を抑止する. さらに, カオス磁力線領域の長大な磁力線結合長

は, 炉心の高性能保持と, ダイバータタイルでの合理的熱処理の両立に道を開く. カオス磁力線領域を離脱した磁力線 (ダイバータレッグ) は直ちに真空容器壁に到達・固定される. そのためダイバータレッグはバルーニング型不安定, プラズマの位置不安定を抑止する. LHD 磁場の 3 重構造を, 3T ポートに設置され, 2U ポートの起立ダイバータタイルを監視する ccd カメラからみた立体構造で示す. 「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe の GUI(8 頁参照) で次のような入力データをを作成する.

表 51: 内寄せ標準磁場配位の磁力線・磁気面解析を解析するデータファイル fort.50

内寄せ標準磁場配位の磁力線・磁気面解析を解析するデータファイル fort.50

```
1 1 −300 3 0 18.0 360.0 7.0 1 './r360_1000_cut_r'
## 新規/図形化処理, cad data, cad 出力ステップ幅, 再描画間隔, 損突粒子のみ (1)/全粒子 (0), phi0, phi1, ドットサイズ (mm), 面 (0)/線 (1) ファイル名 (接辞名)
11000, 11000, 11000, −17967, −3007, 11229, 0.0, 100000.0, ' RAX=3.6 M, BAX=2.75 T, gamma=1.254'
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0
## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) とコメント/ lid_upper(A·T) / lid_lower(A·T) / dividing points
0.0, 0.0, 0.0, 0, 0.0
## LID ヘッド位置, 最深部 r,  最浅部 r,  分割数,  図面の最大水平距離
11, 0, 1, 0.0, 0.07, 0.07, 0, 0.0, 0.0, 0.0, ''
## ダイバータタイルの有無, アーマタイルの有無, ICRF アンテナの有無, 3.5UL 振り角度, 4.5UL 後退量, 7.5UL 後退量, 追加リミターの有無とデータファイル名
20, 0
## 最大トーラス周回数と追跡方向 (−1: −B 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)
3 ## 出発点座標系 (0:回転ヘリカル座標系, 1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)
1000 , 100(注 1), 7, 10, 0
## 径, ポロイダル, トロイダル (1 ヘリカルピッチ) 各方向分割数, 磁気面間隔, 磁気島プロットせず
0.5,
## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数), 磁気面領域描画の有無
0.0, 27.0, 3, 1, 0
## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 ( = 1 : 仮定する), 詳細図 (1)/通常 (0)
0, 0.1, 2.5
## 磁場強度あるいは視線と磁力線交差角分布に対する等高線図プロットの有無とそのためのデータ
1, 7.0772, 1.3691, 0.4749, 2.60488, 2.026, −1.3955, 0.0, 0.0, 0.0, 3.2
## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心. 最大視野
3, 7.0722, 1.3691, 0.4749, 2.60488, 2.026, −1.3955, 2.45, 10.0, −2
## 立体図の有無と視点, 視野間中心, 視点とスクリーン位置までの距離,  視野角 (度), ドットサイズ
1, 1, 0, 0, 0, 0, 1
## 立体図に示す構造物と磁力線 (真空容器, リミター, ヘリカルコイルと容器, 垂直磁場コイル, 磁気島コイル, 磁力線)
1, 1
## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定
' STANDARD CONFIGURATION 1'
### 計算結果に書き込む任意のコメント. データの終了
```

(注 1) : ダイバータレッグ, ダイバータ痕 (diverter footprints) を明瞭に示すため, 出発地点は稠密に設定した.

磁力線ダイバータチャート, 子午面伝面磁力線貫通図, 任意断面磁力線貫通図, 磁力線立体

図を以下に示

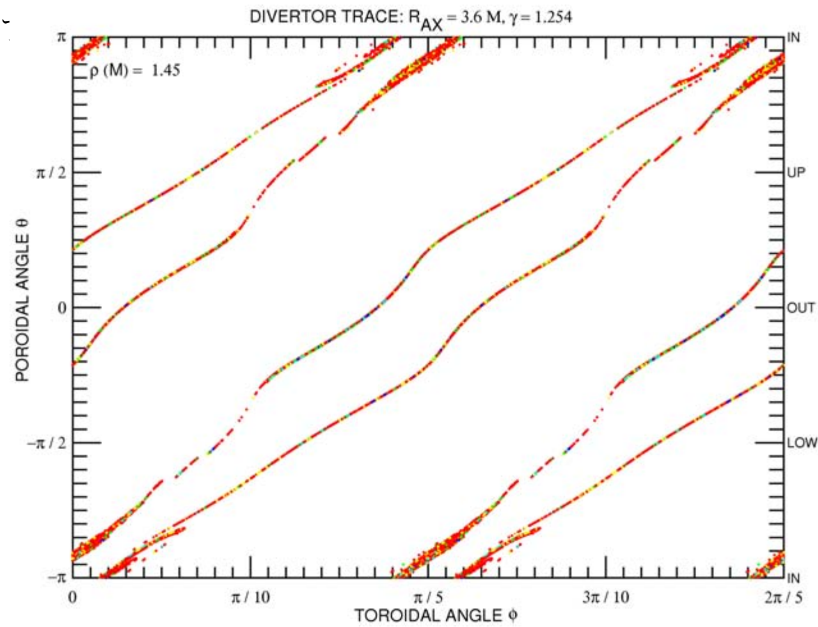


図 14: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.6\,{\rm m}$ 配位) でのダイバータチャート. 横軸はトロイダル角, 縦軸はポロイダル角を示す. ダイバータ磁力線の結合長に応じてダイバータ痕 (diverter footprints) が色分け (58 頁参照) されている.

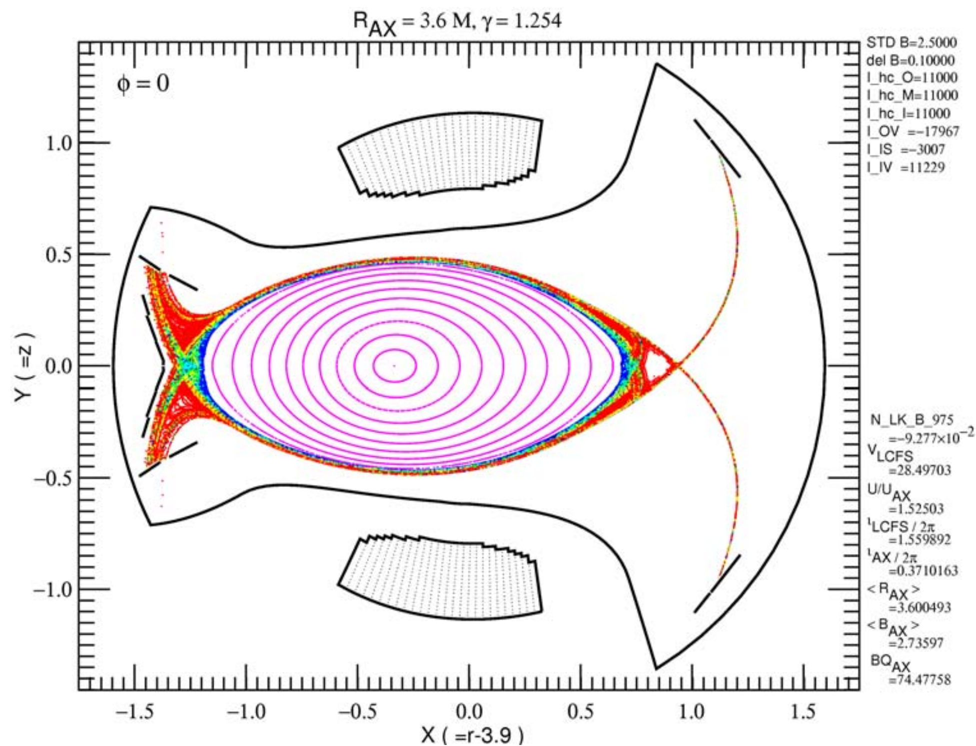


図 15: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.6\,{\rm m}$ 配位) での子午面 $\phi = 0$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸. ダイバータ磁力線は結合長に応じて色分け (58 頁参照) されている. 磁気面は鮮紅色のドットで記されている.

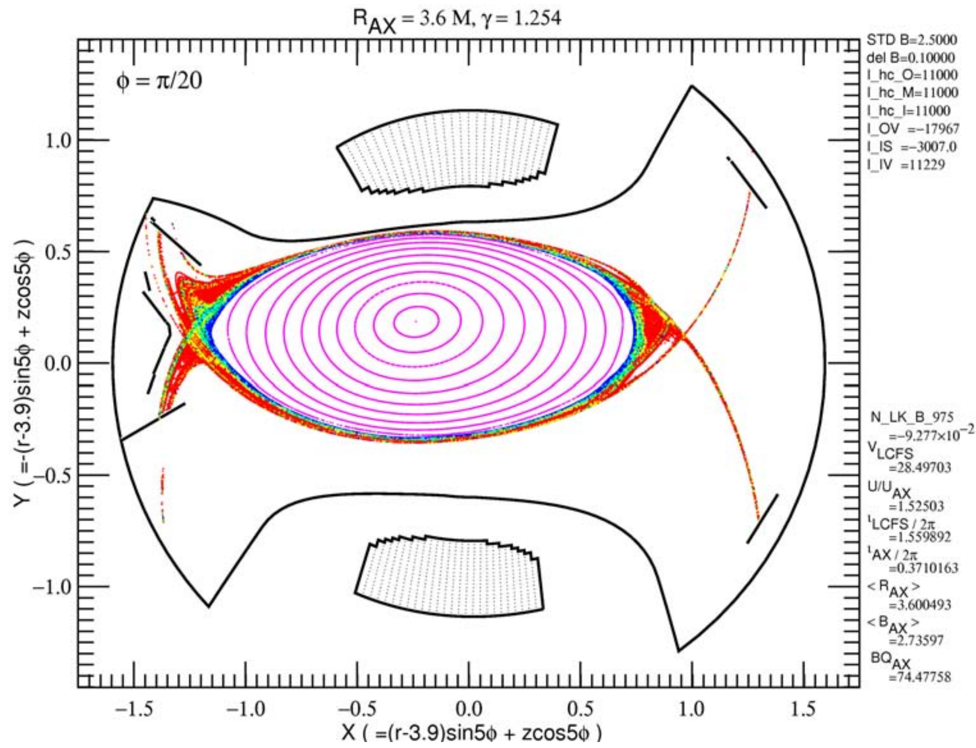


図 16: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.6\,{\rm m}$ 配位) での子午面 $\phi = \pi/20$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

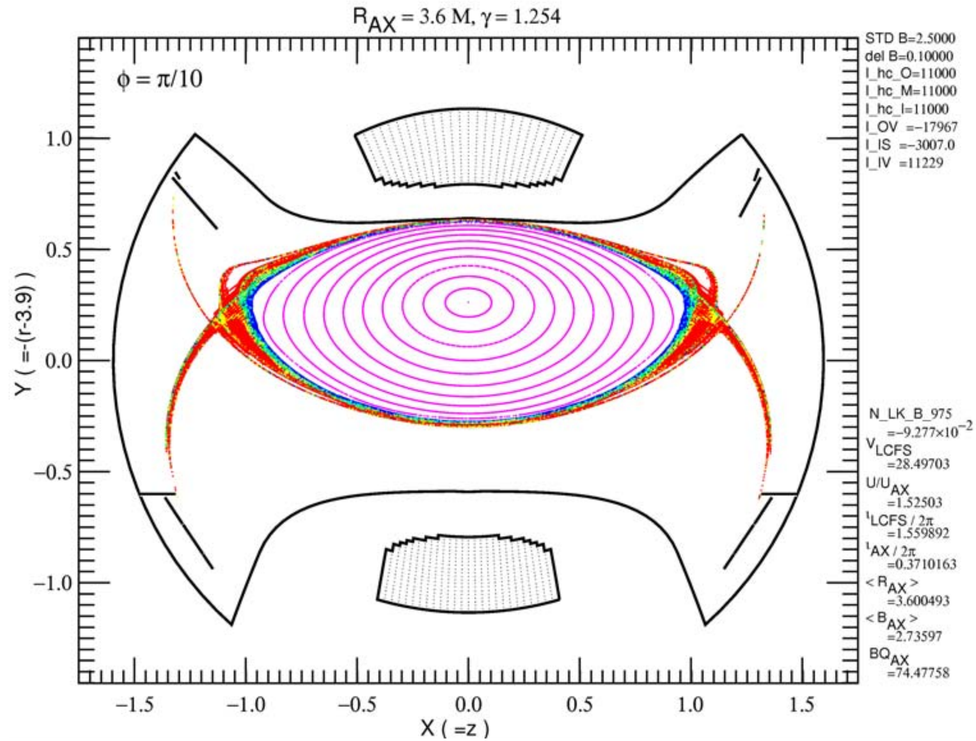


図 17: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.6\,{\rm m}$ 配位) での子午面 $\phi = \pi/10$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

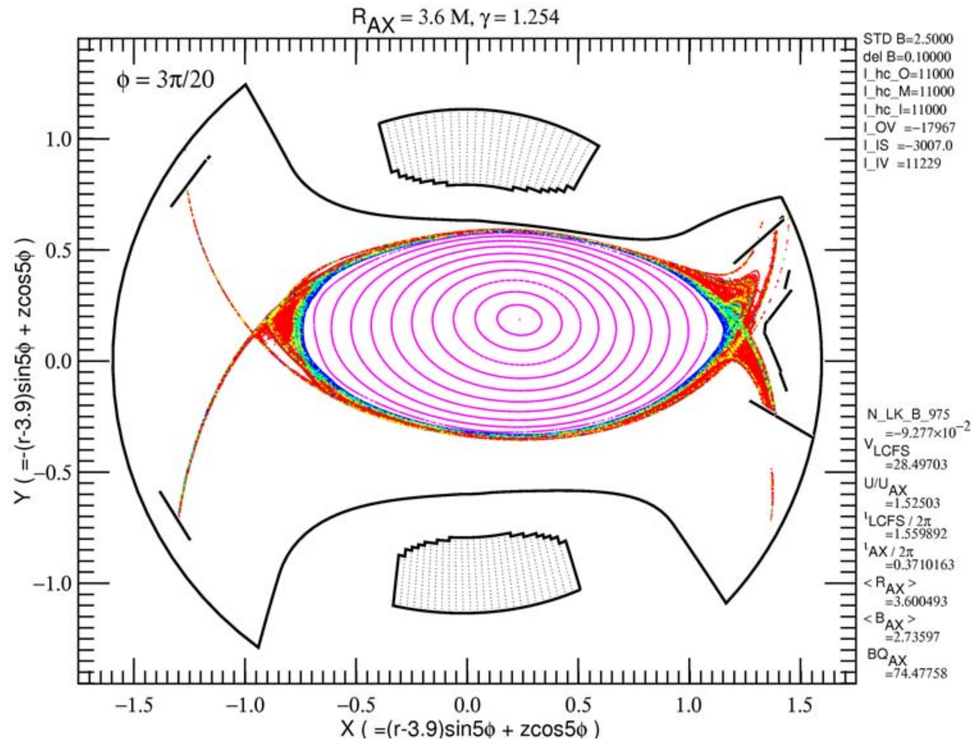


図 18: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{\mathrm{ax}} = 3.6\,\mathrm{m}$ 配位) での子午面 $\phi = 3\pi/20$ における磁力線貫通図. 横軸は回転へリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

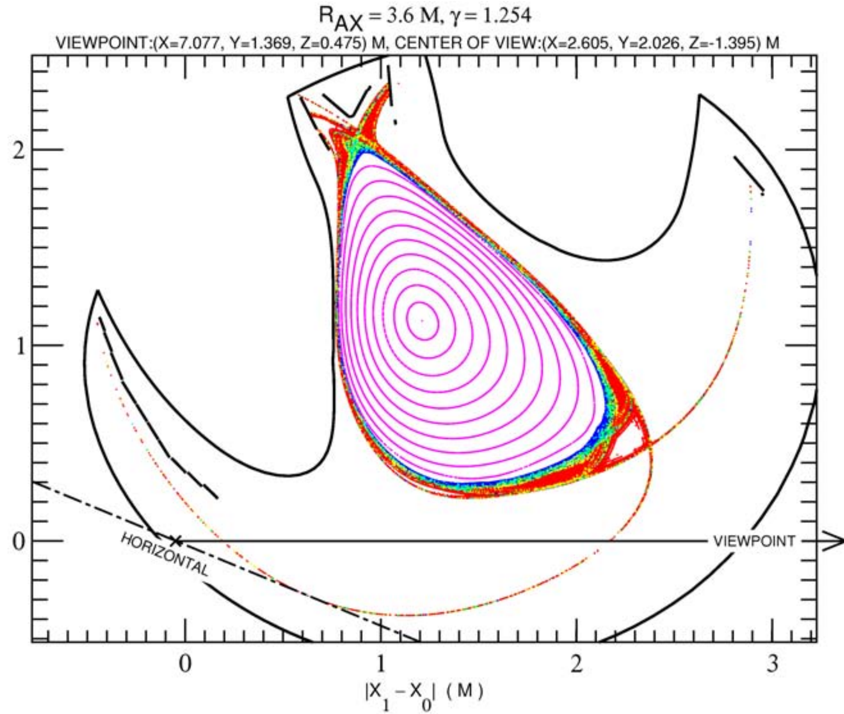


図 19: 3T ポートに設置し, 2U ポートの起立ダイバータを監視する ccd カメラ位置 ($(x, y, z) = (7.0772, 1.3691, 0.4749)\,\mathrm{m}$) を視点とし, 視野中心位置 $(2.60488, 2.0260, -1.3955)$ を見下ろす視線が定める平面を通過する磁力線貫通図.

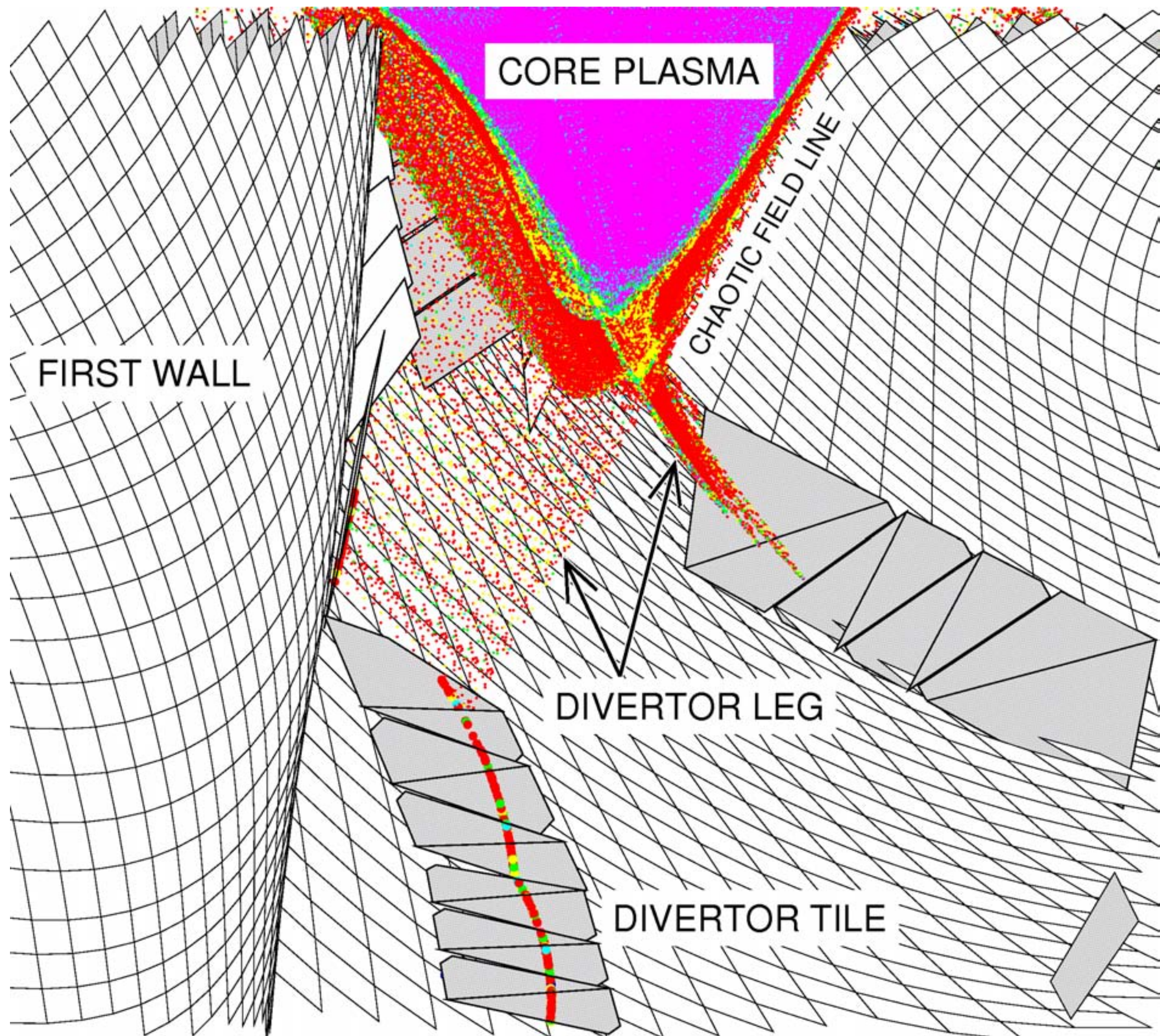


図 20: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.6\,\rm m$ 配位) での磁場構造. 3T ポートに設置し, 2U ポートの起立ダイバータを監視する ccd カメラ位置から見た LHD の磁場構造. 磁気面構造とカオス磁力線領域, ダイバータレッグの関係を示す. 断面図を示すため, $r \geq r_{\rm ax}$ の関係を満たす磁力線はプロットしていない. コイル電流値は表 50 で与えられている.

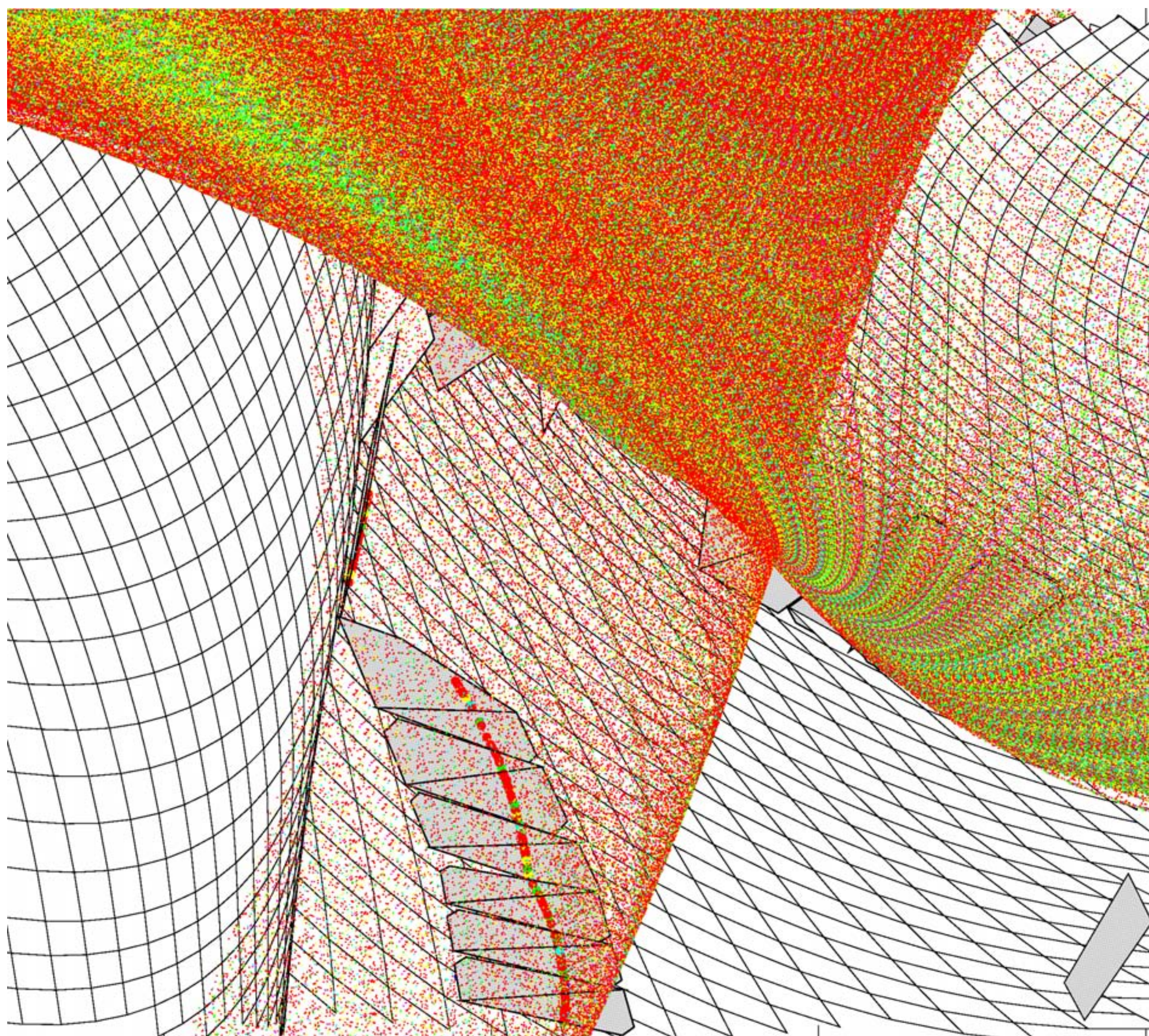


図 21: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{\mathrm{ax}} = 3.6\,\mathrm{m}$ 配位) での磁場構造. 3T ポートに設置し, 2U ポートの起立ダイバータを監視する ccd カメラ位置から見ている. 磁気面領域はカオス磁力線領域の背後に隠され, カオス磁力線領域とダイバータレッグとが見えている. コイル電流値は表 50 で与えられている.

通常の LHD 実験では 6T ポートに設置した ccd カメラで ICRF アンテナ (7.5UL) の表面を監視している．このカメラは IR ボロメータに合わせ, トロイダル方向に向けら, カメラ位置と焦点は表 52 のように設定されている (直交座標系).

表 52: 6T 設置 ccd カメラの設定データ

	x (m)	y (m)	z (m)
カメラ位置	1.423	−6.158	0.236
焦点位置	−0.912	−3.544	0.087

このカメラは真空容器外にある, 投影面 (スクリーン) を真空容器内に持ち込むため, 視点・スクリーン間距離 (51 参照) l_scrn は 1.45 m と設定する．さらに, 可視光では高温プラズマは透明であり, 見えるのは磁力線がダイバータタイルに到達しているカオス磁力線領域の低温プラズマのみである．プラズマ表面を覆うカオス磁力線領域を稠密に画像化すると, 透明感は再現できないので, 出発地点は粗く設定する．

6T ポートに設置した ccd カメラでプラズマを接線方向に見た画像を再現するためには,「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe の GUI (8 頁参照) で次のような入力データを (fort.50) を用意する．

表 53: 内寄せ標準磁場配位のカオス磁力線領域立体画像を作成するデータファイル fort.50

```
内寄せ標準磁場配位のカオス磁力線領域立体画像を作成するデータファイル fort.50
1 1 −300 3 0 18.0 360.0 7.0 1 './r360_50_7t_fll'
## 新規/図形化処理, cad data, cad 出力ステップ幅, 再描画間隔, 損突粒子のみ (1)/全粒子 (0), phi0, phi1, ドットサイズ (mm), 面 (0)/線 (1) ファイル名 (接辞名)
11000, 11000, 11000, −17967, −3007, 11229, 0.0, 100000.0, ' RAX=3.6 M, BAX=2.75 T, gamma=1.254'
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0
## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) とコメント/ lid_upper(A·T) / lid_lower(A·T) / dividing points
0.0, 0.0, 0.0, 0, 0.0
## LID ヘッド位置, 最深部 r,  最浅部 r,  分割数,  図面の最大水平距離
11, 0, 1, 0.0, 0.07, 0.07, 0, 0.0, 0.0, 0.0, ''
## ダイバータタイルの有無, アーマタイルの有無, ICRF アンテナの有無, 3.5UL 振り角度, 4.5UL 後退量, 7.5UL 後退量, 追加リミターの有無とデータファイル名
20, 0
## 最大トーラス周回数と追跡方向 (−1: −B 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)
3
## 出発点座標系 (0:回転ヘリカル座標系, 1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)
50 , 17(注 1), 7, 10, 0
## 径方向分割数, ポロイダル方向分割数, トロイダル方向分割数 (1 ヘリカルセクション), 磁気面枚数, カオス磁気面領域の磁気島のみプロット
0.5,
## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数), 磁気面領域描画の有無
0.0, 27.0, 3, 1, 0
## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 ( = 1 : 仮定する), 詳細図 (1)/通常 (0)
```

前ページ からの続き

内寄せ標準磁場配位のカオス磁力線領域立体画像を作成するデータファイル fort.50

```
0, 0.1, 2.5
## 磁場強度あるいは視線と磁力線交差角分布に対する等高線図プロットの有無とそのためのデータ
1, 1.423, −6.158, 0.236, −0.912, −3.544, 0.087, 0.0, 0.0, 0.0, 3.2
## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心．最大視野
3, 1.423, −6.158, 0.236, −0.912, −3.544, 0.087, 1.45, 19.0, 5(注 2)
## 立体図の有無と視点, 視野間中心，視点とスクリーン位置までの距離， 視野角 (度) ドットサイズ
1, 1, 0, 0, 0, 0, 1
## 立体図に示す構造物と磁力線 (真空容器，リミター，ヘリカルコイルと容器，垂直磁場コイル，磁気島コイル，磁力線)
1, 1
## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定
' STANDARD CONFIGURATION 2'
### 計算結果に書き込む任意のコメント．データの終了
```

(注 1)： 磁力線に透明感を持たせるため, 出発地点は祖に設定した.
(注 2)： 磁力線に透明感を持たせるため, 立体図を描くドットサイズ (34 参照) を極めて小さく設定した.

計算結果を図 22, 図 23 に示す.

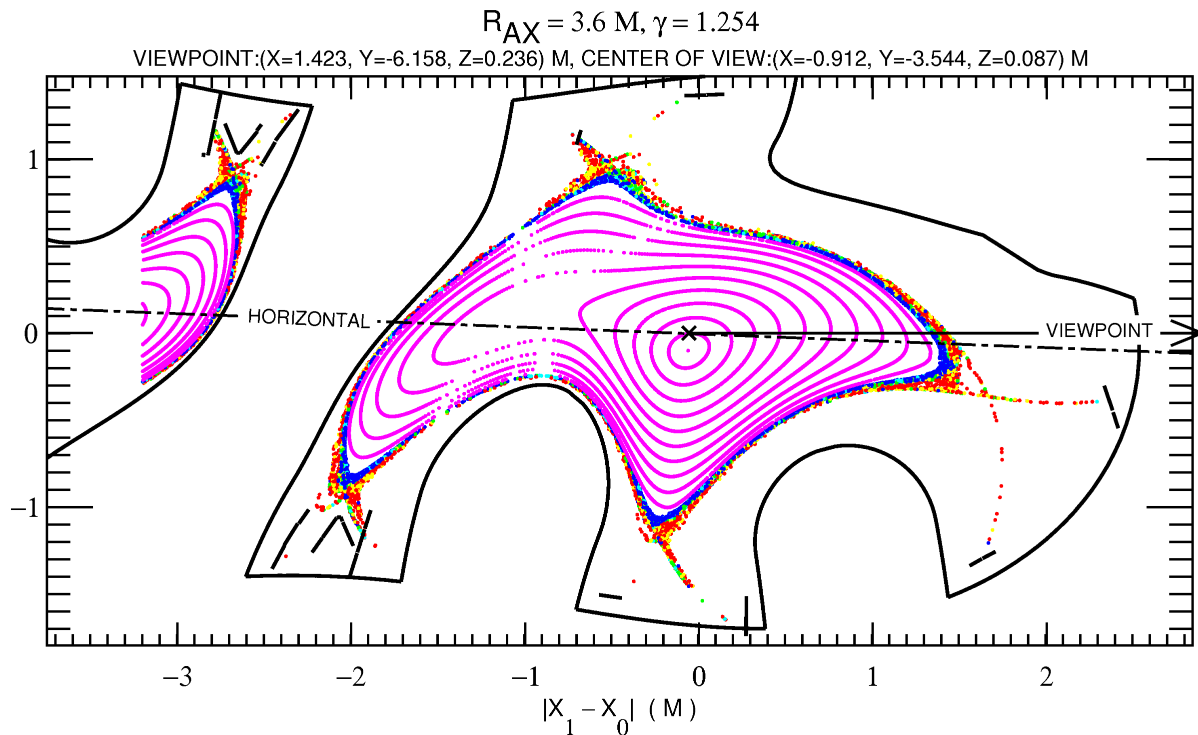


図 22: 6T ポートに設置し，ICRF アンテナ表面を監視する ccd カメラ位置 $((x, y, z) = (1.423, -6.158, 0.236)\,\mathrm{m})$ を視点とし，視野中心位置 $(-0.912, -3.544, 0.087\ )$ を見通す視線が定める平面を通過する磁力線貫通図. 図の原点 $(0, 0)$ は視野中心を表し, 横軸は視線方向, 縦軸は, 鉛直方向と視線ベクトルとで作るベクトル積の方向. 縦軸と横軸の単位は m である. この図の縦軸はほぼ r 方向となっている.

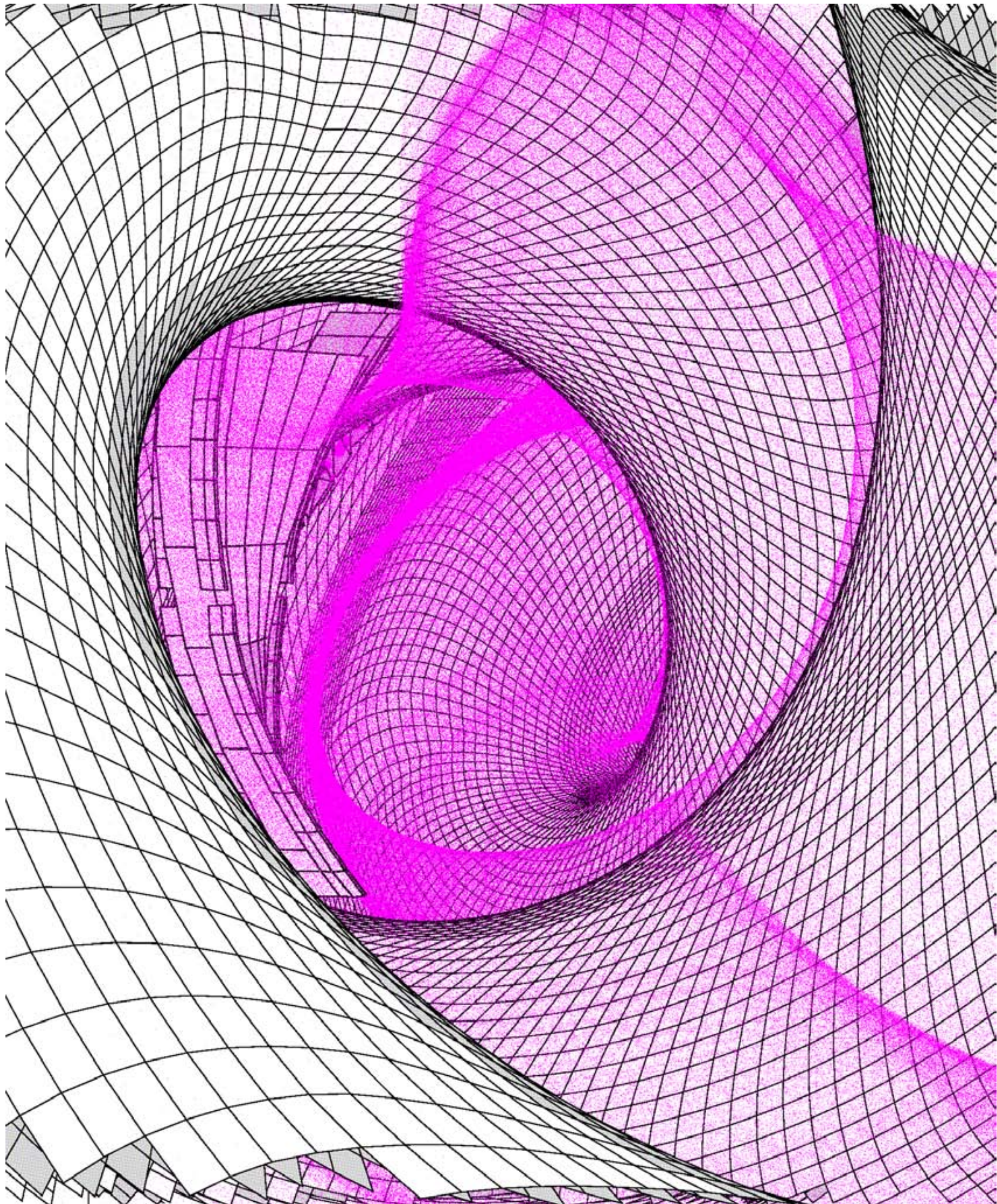


図 23: 6T ポートに設置し ICRF アンテナ表面を監視する ccd カメラの位置から見たカオス磁力線領域の立体画像．ここでは, 図のコントラストを高めるため, 磁力線のドットは全て鮮紅色 (RGG=(1,0,1)) でプロットした．ICRF アンテナ (7.5UL) も磁力線の背後に見えている. 磁場は内寄せ標準磁場配位 ($R_{\mathrm{ax}} = 3.6\,\mathrm{m}$ 配位).

内寄せ標準磁場配位 ($R_{\mathrm{ax}} = 3.6\,\mathrm{m}$ 配位) では，ダイバータ磁力線を構成するヒゲ磁力線のやや顕著な分裂が I ポートの近辺に出現する．この状況を確認するためには，表 51 の第 11 データ (47 頁 4.10.1 節参照) を次のように設定すればよい.

```
1, 0.0, 72.0, 12.0, −1.6, 0.0, 0.1, 0.1, 40.0, 1
## 立体図の有無と視点, 視野間中心, 視点とスクリーン位置までの距離, 視野角 (度), ドットサイズ
```

図 24 に示す計算結果を得る.

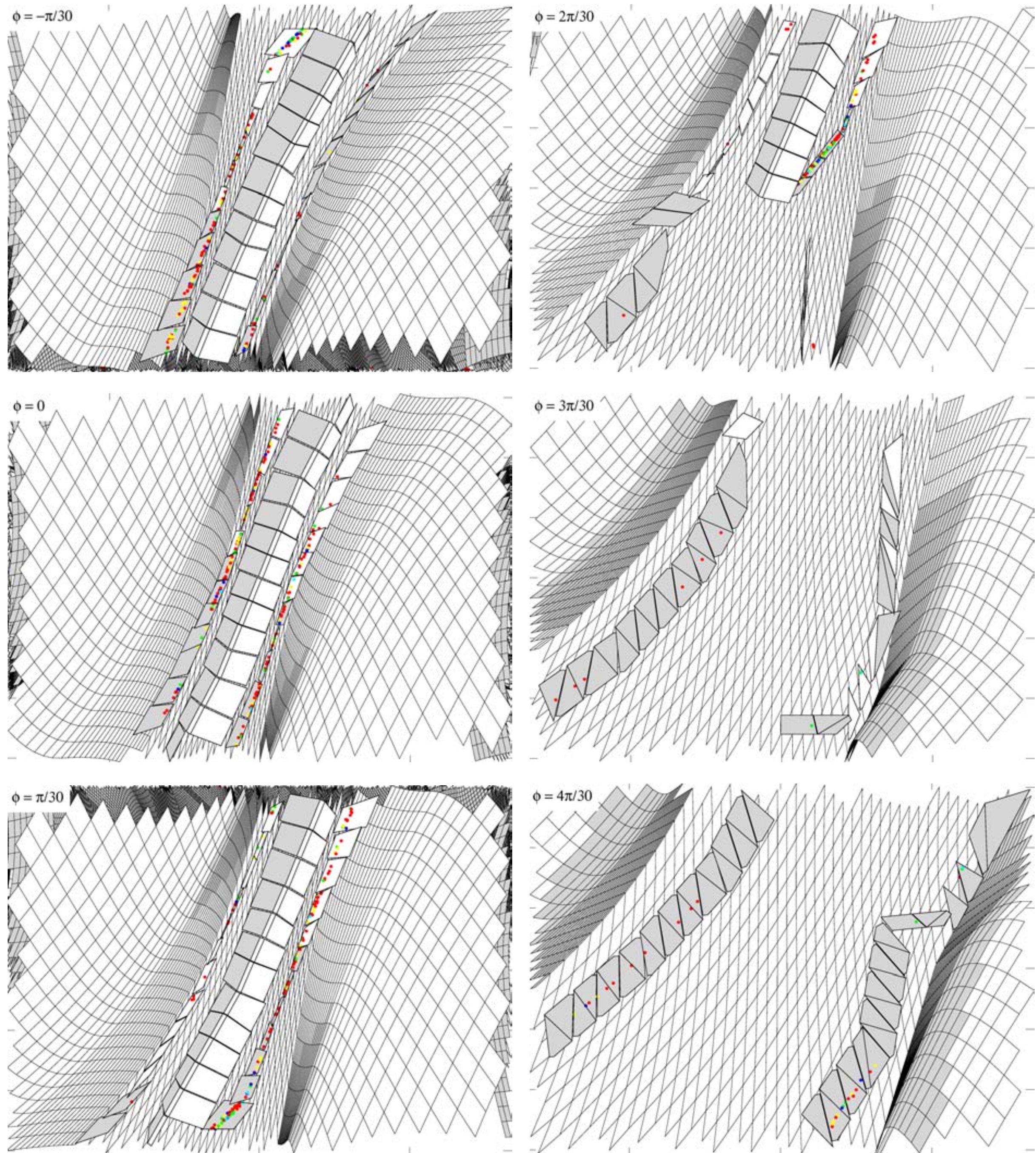


図 24: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.6\,{\rm m}$ 配位) におけるダイバータ痕 (diverter footprints). トーラス内側 (インボードサイド) を見る. インボード側にはダイバータタイルとドーム構造が見える.

5.3 LHD の標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$) の磁力線・磁気面構造解析例

LHD 実験が立案された当初, プラズマの MHD 安定性と, 良好な高エネルギー粒子閉じ込めの両立を勘案して決定された標準配位が磁気軸位置を $R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$ とした配位である (標準配位 あるいは, $R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$ 配位) . ダイバータタイルはこの $R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$ 配位をもとに設置された. しかしながら, カオス磁力線領域での荷電分離中和効果, および, ダイバータレッグ固定効果により, LHD プラズマでは MHD 不安定が抑制されていることが明らかになるにつれ, $R_{\rm ax} = 3.6\,{\rm m}$ 配位が LHD の標準磁場配位として, 重要視されてきた.

標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$ 配位) の特徴は次のようになる.

- 最外殻磁気面での回転変換は $\iota_{\rm LCFS}/2\pi \simeq 1.332$ であり, その近辺では有理数の密度が極めて高い [3].
- 最外殻磁気面の外側を取り囲むカオス磁力線領域の厚みが極めて厚い. 上記と関係している可能性がある.
- 最外殻磁気面の囲む体積 $V_{\rm LCFS}$ とカオス磁力線の体積は次のようになる [3].

$$V_{\rm LCFS} \simeq 27.0\,{\rm m}^3$$

$$V_{\rm chaos} \simeq 5.0\,{\rm m}^3$$

  $R_{\rm ax} = 3.6\,{\rm m}$ 配位に比べると, $V_{\rm LCFS}$ はほぼ, 1 割少なく, $V_{\rm chaos}$ は約 2.5 倍となっている.

- ダイバータ磁力線を構成するヒゲ磁力線は全領域できれいにまとめられている.

磁気軸上磁場強度が 2.75 T ($B_{\rm ax} = 2.75\,{\rm T}$), となる $R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$ 配位を実現するコイル電流値は次で与えられる.

$R_{\rm ax}$	$B_{\rm ax}$	H_O (A)	H_M (A)	H_I (A)	OV (A)	IS (A)	IV (A)
3.75 m	2.75 T	11532	11532	11532	−18112	−4574	9481

表 54: $R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$ 配位のコイル電流値

「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe の GUI (8 頁参照) で次のような入力データを (fort.50) を作成する.

表 55: 標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$) の磁力線・磁気面解析を解析するデータファイル fort.50

標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$) の磁力線・磁気面解析を解析するデータファイル fort.50

```
1 1 −300 3 0 18.0 360.0 7.0 1 './r375_500_cut4'
## 新規/図形化処理, cad data, cad 出力ステップ幅, 再描画間隔, 損突粒子のみ (1)/全粒子 (0), phi0, phi1, ドットサイズ (mm), 面 (0)/線 (1) ファイル名 (接辞名)
```

前ページ からの続き

標準磁場配位 ($R_{\mathrm{ax}} = 3.75\,\mathrm{m}$) の磁力線・磁気面解析を解析するデータファイル fort.50

```
11532, 11532, 11532, −18112, −4574, 9481, 0.0, 100000.0, ' RAX=3.75 M, BAX=2.75 T, gamma =1.254'
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0
## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) とコメント/ lid_upper(A·T) / lid_lower(A·T) / dividing points
0.0, 0.0, 0.0, 0, 0.0
## LID ヘッド位置, 最深部 r, 最浅部 r, 分割数, 図面の最大水平距離
11, 0, 1, 0.0, 0.07, 0.07, 0, 0.0, 0.0, 0.0, ''
## ダイバータタイルの有無, アーマタイルの有無, ICRF アンテナの有無, 3.5UL 振り角度, 4.5UL 後退量, 7.5UL 後退量, 追加リミターの有無とデータファイル名
20, 0
## 最大トーラス周回数と追跡方向 (−1: −B 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)
3
## 出発点座標系 (0:回転ヘリカル座標系, 1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)
500, 50, 7, 10, 0
## 径方向分割数, ポロイダル方向分割数, トロイダル方向分割数 (1 ヘリカルセクション), 磁気面枚数, カオス磁気面領域の磁気島のみプロット
0.5,
## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数), 磁気面領域描画の有無
0.0, 27.0, 3, 1, 0
## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 ( = 1 : 仮定する), 詳細図 (1)/通常 (0)
0, 0.1, 2.5
## 磁場強度あるいは視線と磁力線交差角分布に対する等高線図プロットの有無とそのためのデータ
1, 7.0772, 1.3691, 0.4749, 2.60488, 2.026, −1.3955, 0.0, 0.0, 0.0, 3.2
## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心. 最大視野
3, 7.0772, 1.3691, 0.4749, 2.60488, 2.026, −1.3955, 2.45, 10.0, −4
## 立体図の有無と視点, 視野間中心, 視点とスクリーン位置までの距離, 視野角 (度), ドットサイズ
1, 1, 0, 0, 0, 0, 1
## 立体図に示す構造物と磁力線 (真空容器, リミター, ヘリカルコイルと容器, 垂直磁場コイル, 磁気島コイル, 磁力線)
1, 1
## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定
' STANDARD CONFIGURATION 3'
### 計算結果に書き込む任意のコメント. データの終了
```

磁力線ダイバータチャート, 子午面伝面磁力線貫通図, 任意断面磁力線貫通図, 磁力線立体図を図 25 ∼ 図 32 に示す.

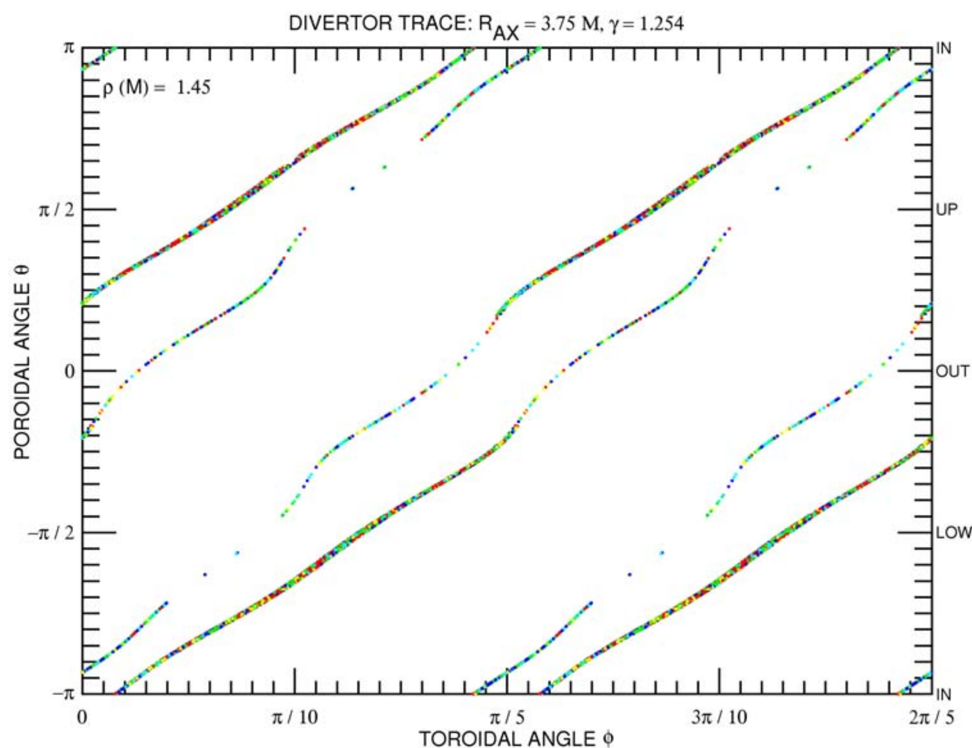


図 25: 標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$ 配位) でのダイバータチャート．横軸はトロイダル角, 縦軸はポロイダル角を示す．ダイバータ磁力線の結合長に応じてダイバータ痕 (diverter footprints) が色分け (58 頁参照) されている．

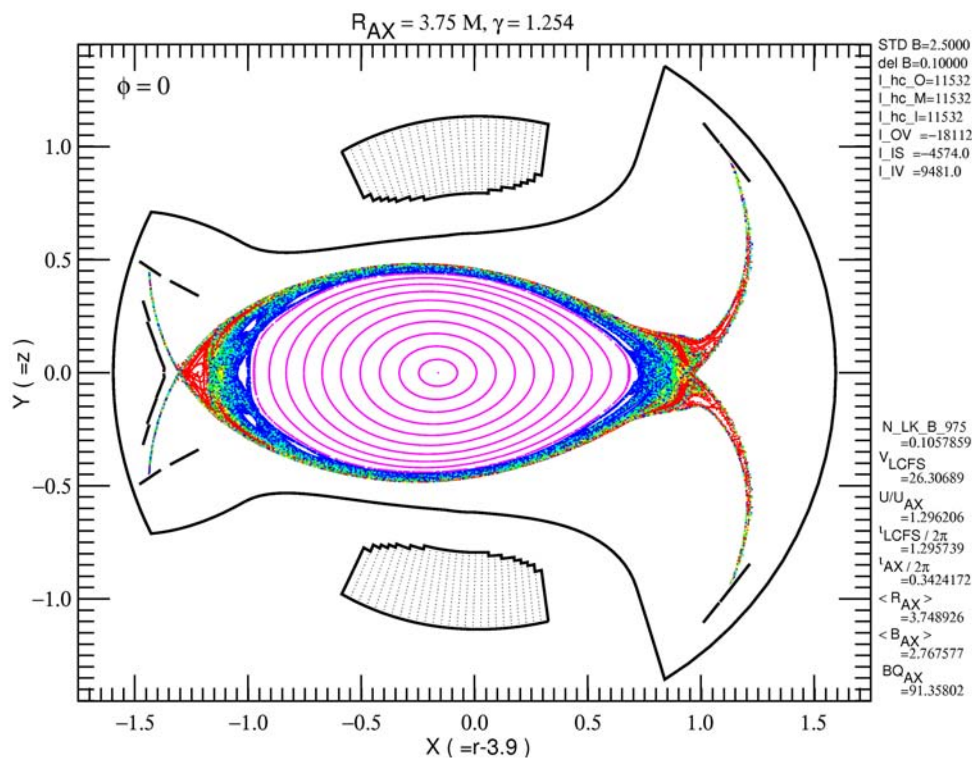


図 26: 標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$ 配位) での子午面 $\phi = 0$ における磁力線貫通図．横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸．ダイバータ磁力線は結合長に応じて色分け (58 頁参照) されている．磁気面は鮮紅色のドットで記されている．

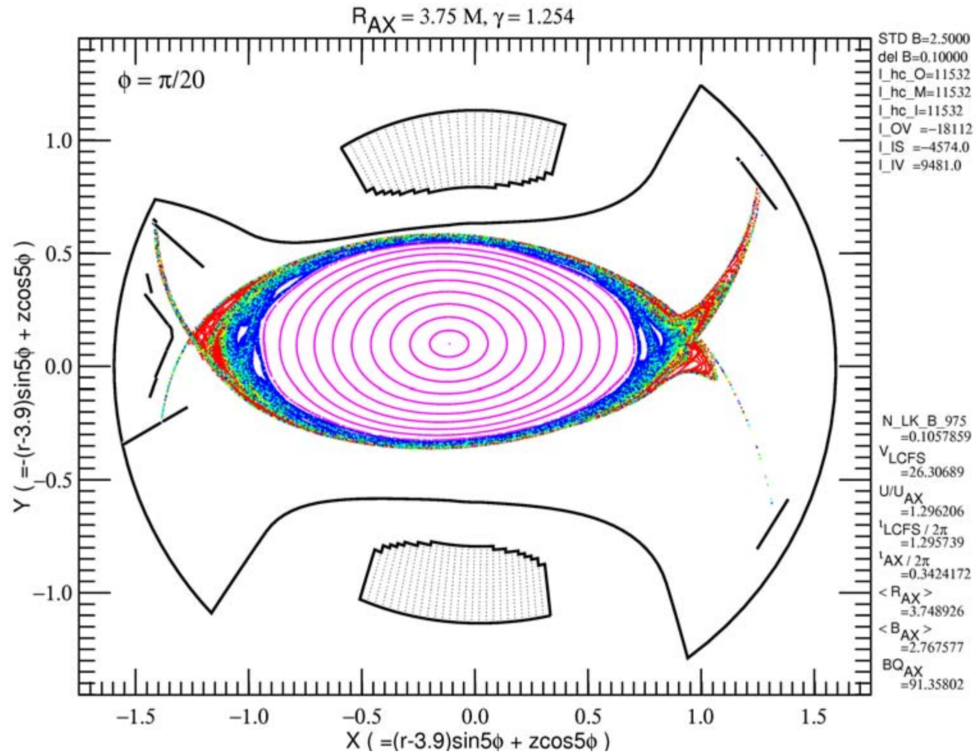


図 27: 標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,\rm m$ 配位) での子午面 $\phi = \pi/20$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

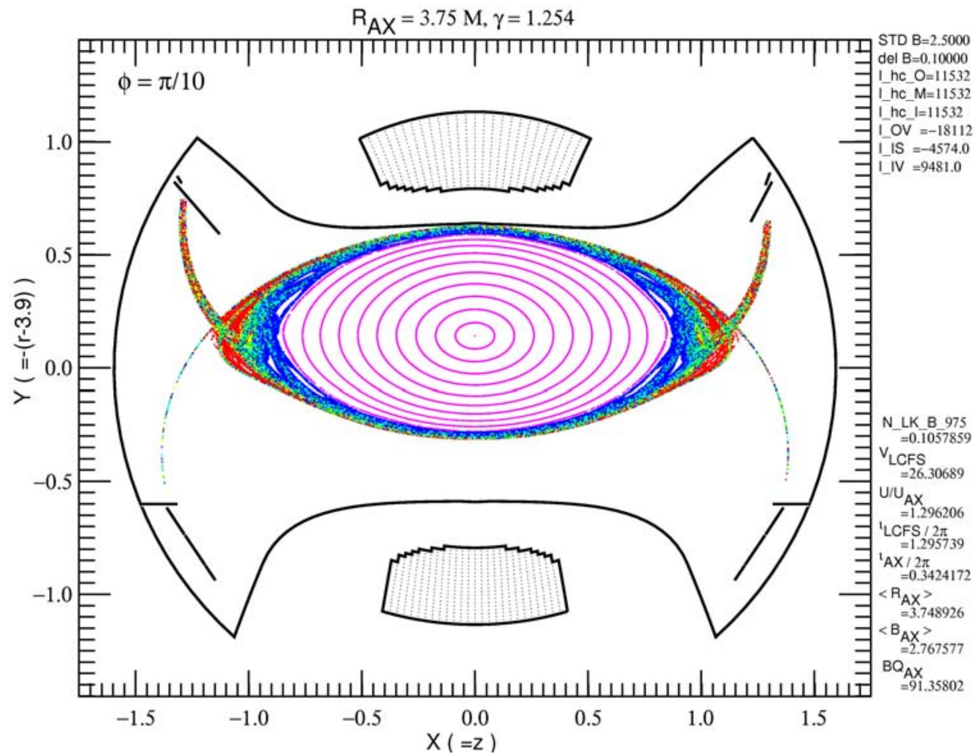


図 28: 標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,\rm m$ 配位) での子午面 $\phi = \pi/10$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

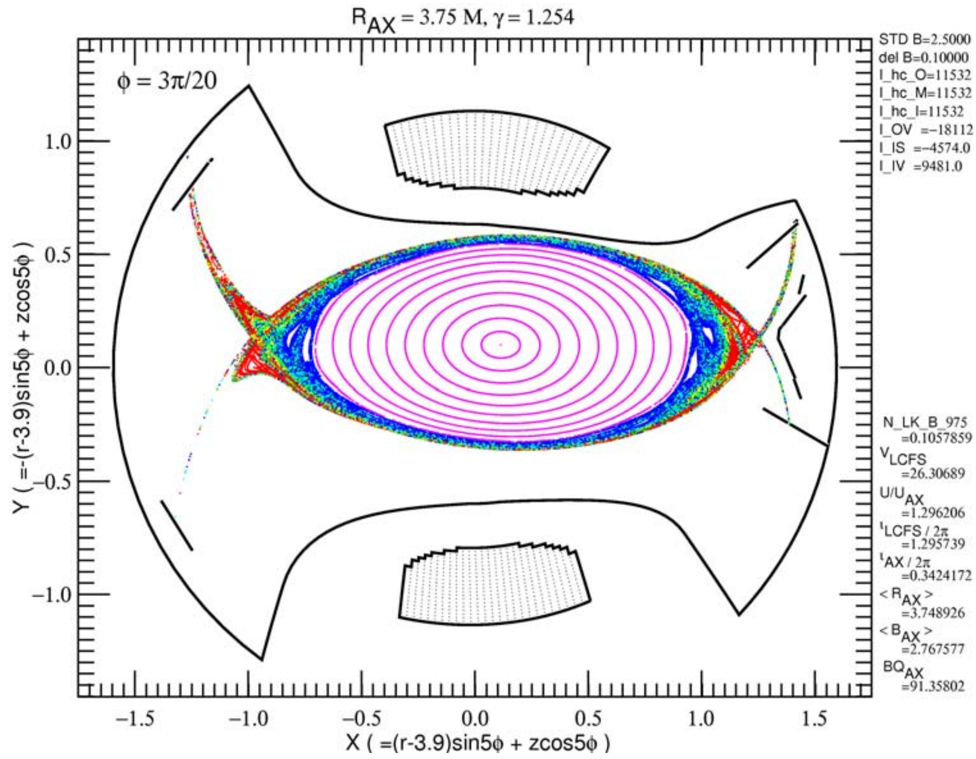


図 29: 標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$ 配位) での子午面 $\phi = 3\pi/20$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

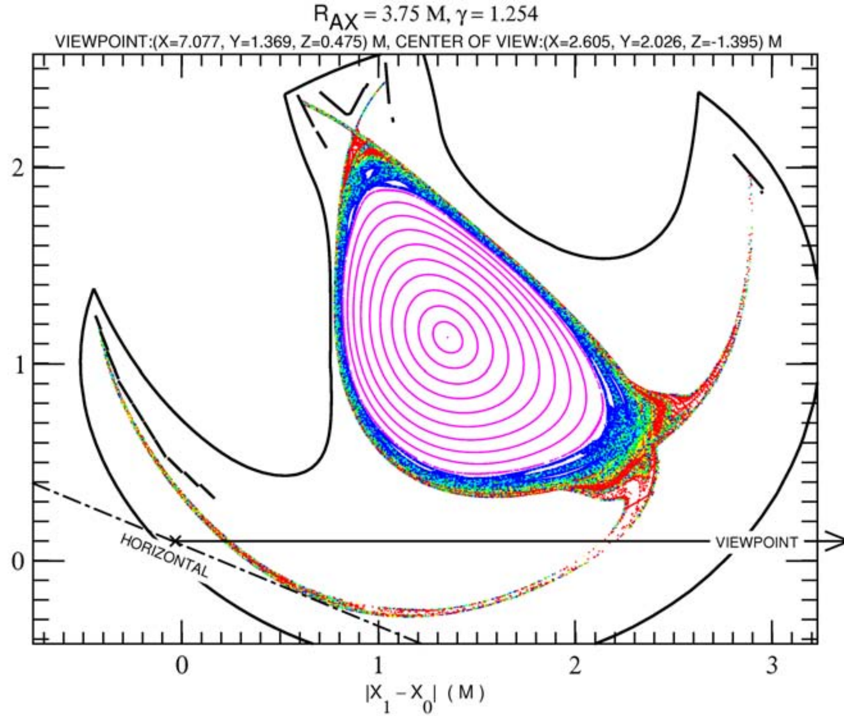


図 30: 3T ポートに設置し, 2U ポートの起立ダイバータを監視する ccd カメラ位置 ($(x, y, z) = (7.0772, 1.3691, 0.4749)\,{\rm m}$) を視点とし, 視野中心位置 $(2.60488, 2.0260, -1.3955)$ を見下ろす視線が定める平面を通過する磁力線貫通図.

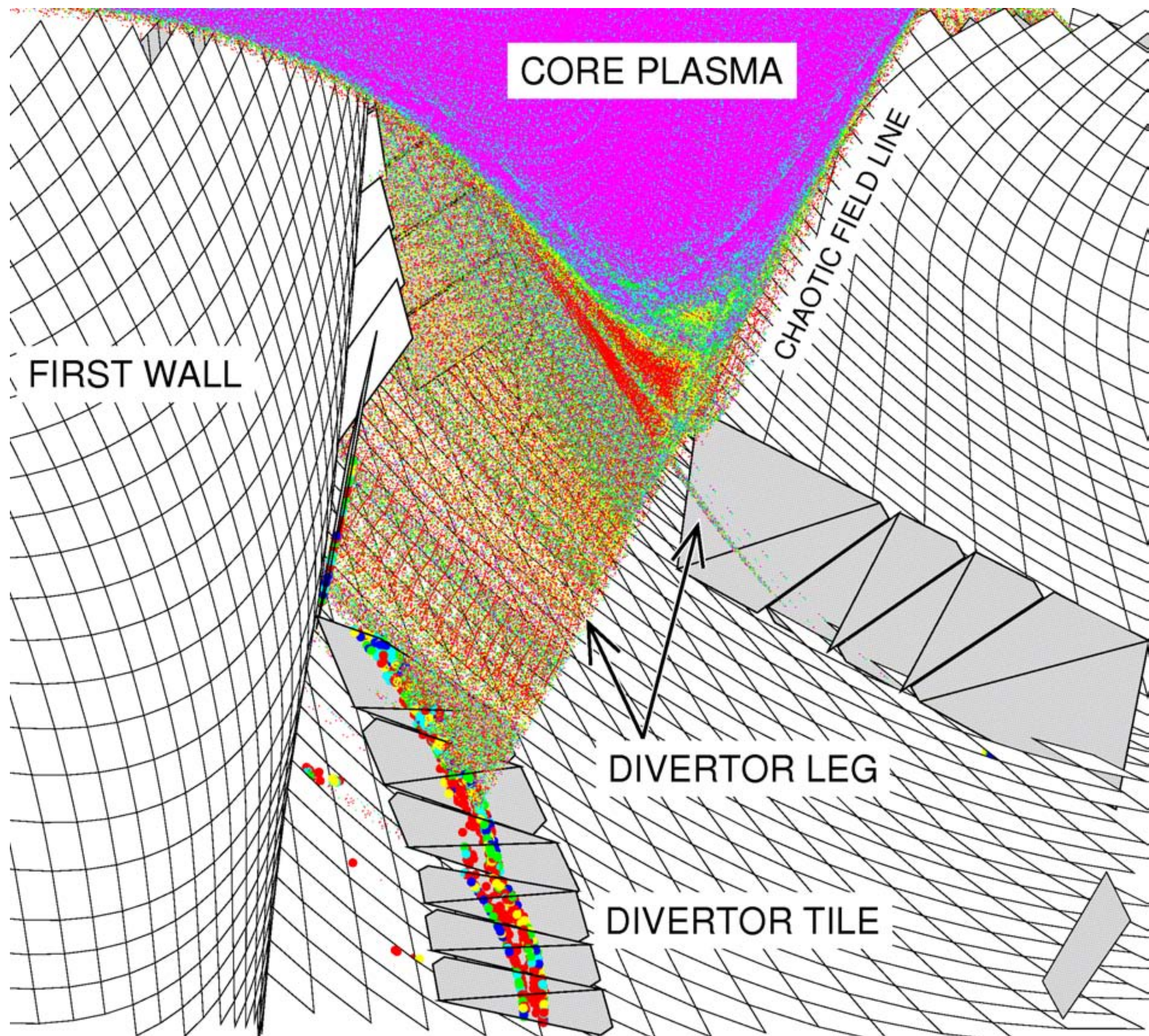


図 31: 標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,\rm m$ 配位) での磁場構造. 3T ポートに設置し, 2U ポートの起立ダイバータを監視する ccd カメラ位置から見た LHD の磁場構造. 磁気面構造とカオス磁力線領域, ダイバータレッグの関係を示す. 断面図を示すため, $r \geq r_{\rm ax}$ の関係を満たす磁力線はプロットしていない. コイル電流値は表 54 で与えられている.

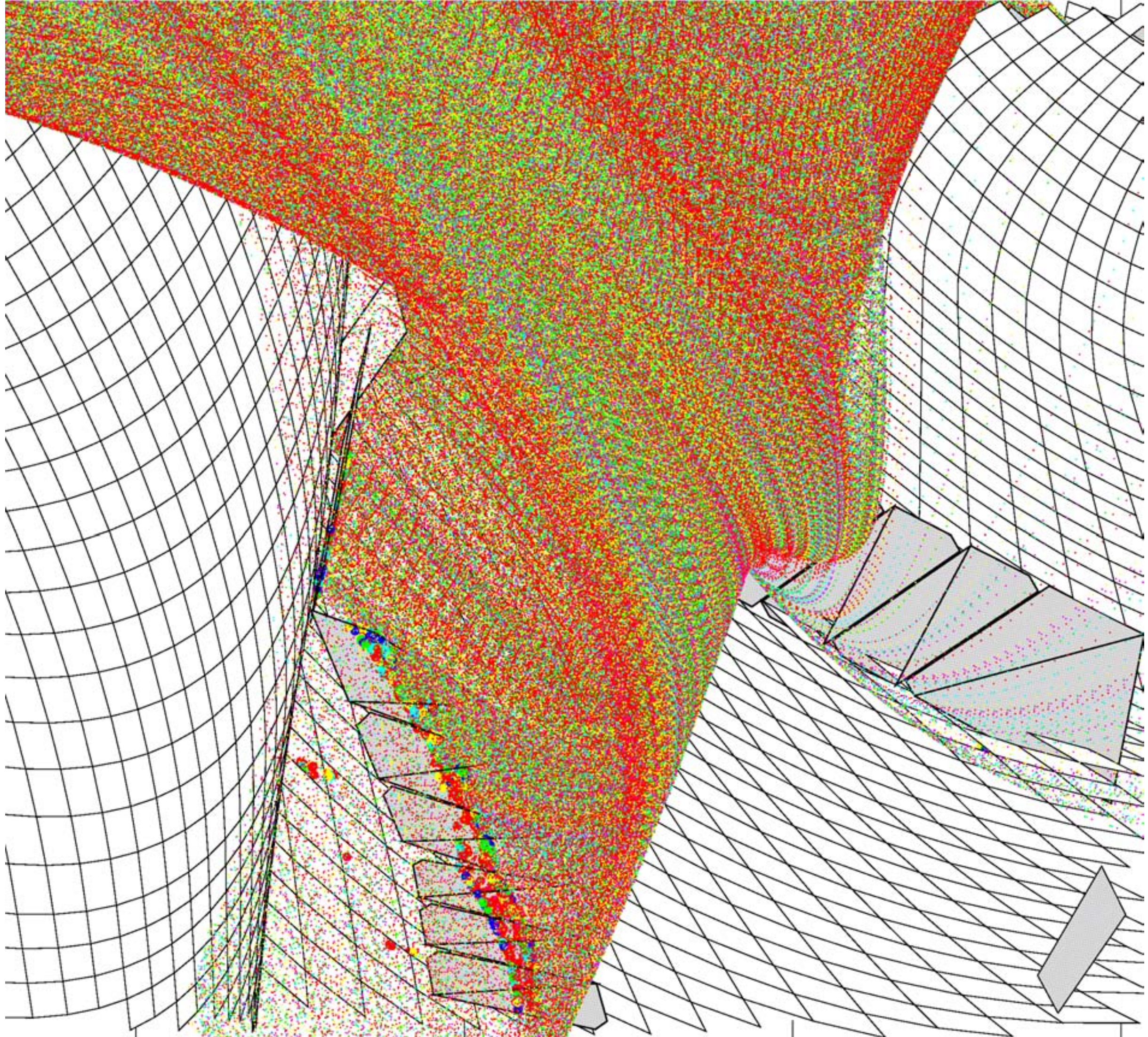


図 32: 標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,\rm m$ 配位) での磁場構造. 3T ポートに設置し, 2U ポートの起立ダイバータを監視する ccd カメラ位置から見た LHD の磁場構造. 磁気面領域はカオス磁力線領域の背後に隠され, カオス磁力線領域とダイバータレッグとが見えている. コイル電流値は表 54 で与えられている.

5.4 Zeeman 効果を用いたLHD 周辺部の中性原子密度計測に対応する計算例

1-O ポートで, z 方向に整列した視線でプラズマからの発光を計測する. プラズマ周辺部の中性原子による発光は Zeeman 効果により, スペクトル分裂が発生する. 発光強度の測定とスペクトル分裂からプラズマ周辺部の中性原子の発光位置および強度が求まる. この測定に対応した磁力線・磁気面の構造を解析する.

計測されるプラズマからの発光は水平でかつ y 軸に対しては $\delta\phi = 6$ 度だけ傾き, x 軸とは

$$r_c = 4.15 + 2.3 \times 10^{-3}/\sin\delta\phi$$

で交差している. よってこの計測に対応する磁力線・磁気面構造を求めるために, この交差地点から計測光方向に 1m だけ離れた赤道面上に視点 $\boldsymbol{x}_{eye}$ を設定しよう. 視野中心 $\boldsymbol{x}_{cntr}$ は赤道面上の計測光と x 軸との交差地点に設定する. これにより, 任意断面磁力線貫通図の原点 (0, 0) はこの交差地点となり, X 軸は交差地点から計測光方向に沿った距離 (計測器の存在する方向が正の方向), Y 軸は z 方向 (鉛直方向) となる. よって, 視点 $\boldsymbol{x}_{eye}$ と視野中心 $\boldsymbol{x}_{cntr}$ を次のように設定すれば十分である.

$$\boldsymbol{x}_{eye} = \begin{pmatrix} 1 \times \sin\delta\phi \\ r_c + 1 \times \cos\delta\phi \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} .1045284632 \\ 5.166525471 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{x}_{cntr} = \begin{pmatrix} 0 \\ r_c \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4.172003576 \\ 0 \end{pmatrix}$$

「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe の GUI(8 頁参照) で次のような入力データを (fort.50) を作成する (内寄せ標準磁場配位 ($R_{\mathrm{ax}} = 3.6\,\mathrm{m}$ 配位) の場合).

表 56: LHD 周辺部の中性原子密度計測に対応する磁力線・磁気面解析を解析するデータファイル fort.50

LHD 周辺部の中性原子密度計測に対応する磁力線・磁気面解析を解析するデータファイル fort.50
1 1 −300 3 0 18.0 360.0 7.0 1 './zeeman_r360' ## 新規/図形化処理, cad data, cad 出力ステップ幅, 再描画間隔, 損突粒子のみ (1)/全粒子 (0), phi0, phi1, ドットサイズ (mm), 面 (0)/線 (1) ファイル名 (接辞名) 11000, 11000, 11000, -17967, -3007, 11229, 0.0, 100000.0, 'RAX=3.6 M, BAX=2.75 T, gamma=1.254' 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0 ## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) とコメント/ lid_upper(A·T) / lid_lower(A·T) / dividing points 0.0, 0.0, 0.0, 0, 0.0 ## LID ヘッド位置, 最深部 r, 最浅部 r, 分割数, 図面の最大水平距離

前ページ からの続き

LHD 周辺部の中性原子密度計測に対応する磁力線・磁気面解析を解析するデータファイル fort.50

```
11, 0, 1, 0.0, 0.07, 0.07, 0, 0.0, 0.0, 0.0, ”
## ダイバータタイルの有無, アーマタイルの有無, ICRF アンテナの有無, 3.5UL 振り角度，4.5UL 後退量，7.5UL 後退量，追加リミターの有無とデータファイル名
20, 0
## 最大トーラス周回数と追跡方向 (−1: −B 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)
3
## 出発点座標系 (0:回転ヘリカル座標系, 1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)
200, 30, 7, 10, 0
## 径方向分割数, ポロイダル方向分割数, トロイダル方向分割数 (1 ヘリカルセクション), 磁気面枚数，カオス磁気面領域の磁気島のみプロット
0.5,
## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数)，磁気面領域描画の有無
0.0, 27.0, 3, 1, 0
## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 ( = 1 : 仮定する), 詳細図 (1)/通常 (0)
0, 0.1, 2.5
## 磁場強度あるいは視線と磁力線交差角分布に対する等高線図プロットの有無とそのためのデータ
1, 0.1045284632, 5.166525471, 0.0, 0.0, 4.172003576, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 3.2
## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心．最大視野
3, 0.1045284632, 5.166525471, 0.0, 0.0, 4.172003576, 0.0, 0.01, 40.0, 5
## 立体図の有無と視点, 視野間中心，視点とスクリーン位置までの距離，視野角 (度), ドットサイズ
1, 1, 0, 0, 0, 0, 1
## 立体図描画物:真空容器, リミター, ヘリカルコイルと容器, 垂直磁場コイル, 磁気島コイル, 磁力線
1, 1
## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指
’ ZEEMAN EFFECT’
### 計算結果に書き込む任意のコメント．データの終了
```

カオス磁力線構造は磁気軸位置によって大きく変化する．中性原子密度計測装置に対面している磁気面・磁力線構造を図 33 に示す.

さらに, 中性原子密度計測装置から見えるカオス磁力線領域の立体図を，図 34 ($R_{\rm ax}$ = 3.6 m 配位の場合) と図 35 ($R_{\rm ax}$ = 3.75 m 配位の場合) とに示す．$R_{\rm ax}$ = 3.75 m 配位は $R_{\rm ax}$ = 3.6 m 配位に比べ, カオス磁力線領域の厚みが厚いことが示されている.

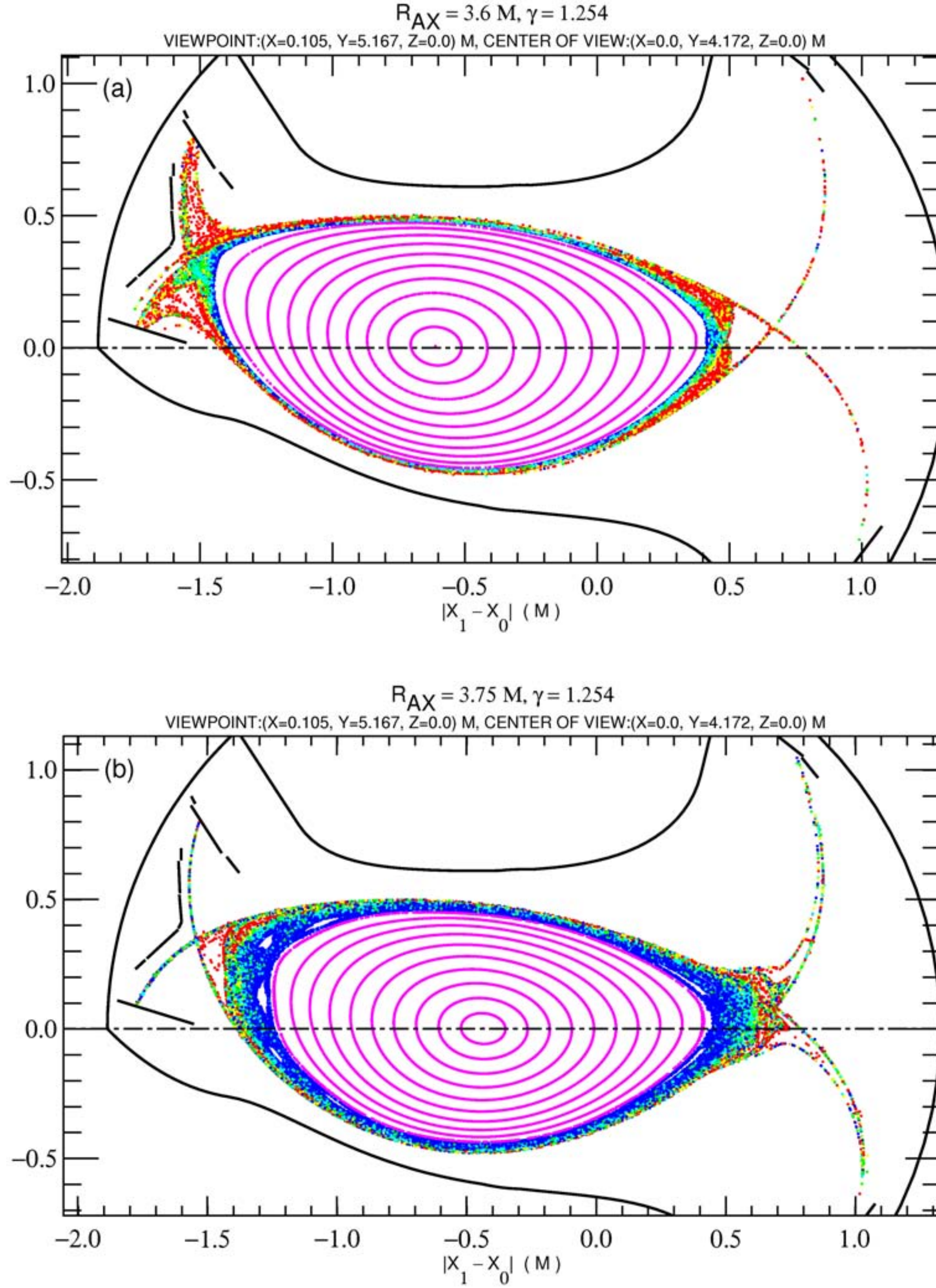


図 33: LHD 周辺部中性原子密度計測装置に対面する磁力線貫通図. 横軸は視線方向 (r 方向, 縦軸は鉛直方向を示す. 図の原点は (0, 0) は視野の中心と定めた位置 $(r, \phi z) = (4.173, 0, 0)$ を示す. (a) 内寄せ標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.6\,{\rm m}$ 配位) の場合. (b) 標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$ 配位) の場合.

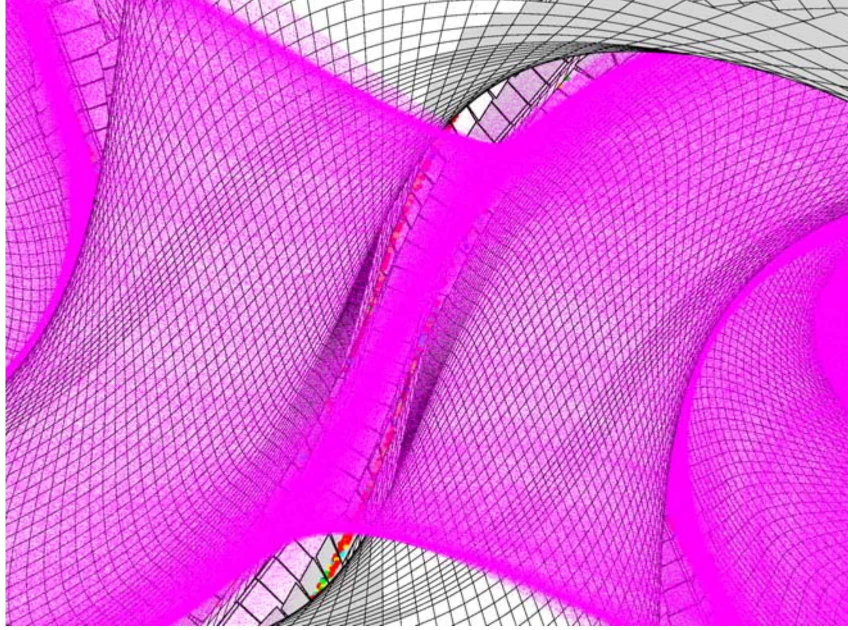


図 34: 1-O ポートに設置された中性原子密度計測装置から見えるカオス磁力線領域の立体図. $R_{\mathrm{ax}} = 3.6\,\mathrm{m}$ 配位の場合.

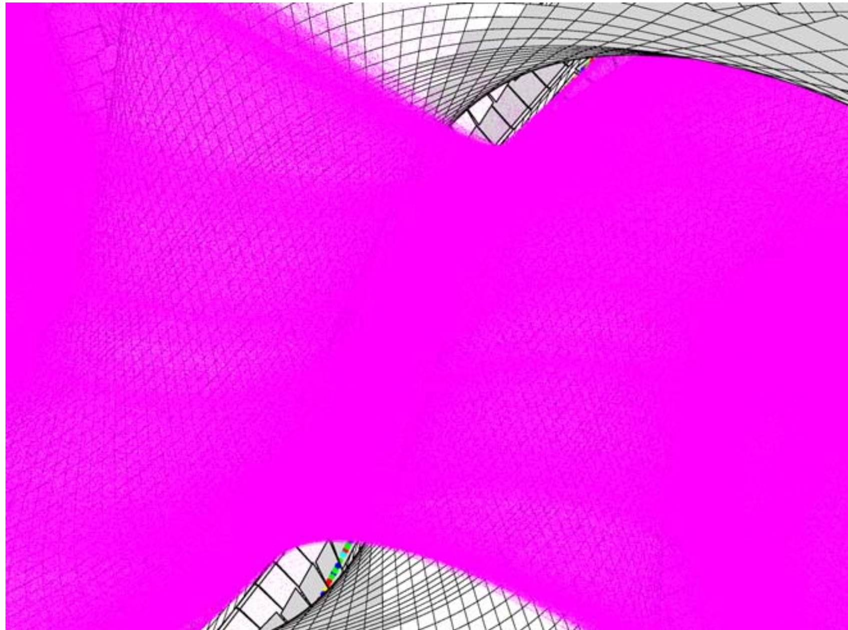


図 35: 1-O ポートに設置された中性原子密度計測装置から見えるカオス磁力線領域の立体図. $R_{\mathrm{ax}} = 3.75\,\mathrm{m}$ 配位の場合.

5.5 LID 磁場の数値解析例

LID 磁場配位は, 磁気面領域には大きな磁気島を持たず, 最外殻磁気面へ接するように大きな $m = 1, n = 1$ 磁気島を形成する配位が典型であろう.

まず最初に LID 磁場コイル電流が未調整の場合の計算結果を図 36 に示す. 「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe の GUI(8 頁参照) で次のような入力データを (fort.50) を作成する (コイル電流を記述する先頭部分のみを示す).

```
1 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 1 './lid_test6_fll'
## 新規/図形化処理, cad data, cad 出力ステップ幅, 再描画間隔, 損突粒子のみ (1)/全粒子 (0), phi0, phi1, ドットサイズ (mm), 面 (0)/線 (1) ファイル名 (接辞名)
11071, 11062, 11073, −17630, −3965.4, 9871.5, 0.0, 100000.0, ' #53754, T=360 SEC, RAX=3.6865 M'
100000.0, −80000.0, −100000.0, −80000.0, −100000.0, −100000.0, 80000.0, 100000.0, 80000.0, 100000.0, 1
100000.0, 80000.0, 100000.0, 80000.0, −100000.0, −100000.0, −80000.0, −100000.0, −80000.0, 100000.0, 0
## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) とコメント/ lid_upper(A·T) / lid_lower(A·T) / dividing points
········· 以下省略
```

計算結果の一部を図 36 に示す.

LID ヘッドを挿入する $m = 1, n = 1$ 磁気島の外側に閉じた磁気面が存在すると, LID ヘッドはリミター的となり, 厳しい熱負荷に曝され, さらに, LHD プラズマの高性能保持を実現しているカオス磁力線領域の機能も期待できなくなる.

最外殻磁気面へ接するように $m = 1, n = 1$ 磁気島を形成するには, 双極子磁場を形成する B2 系統電源の電流を増加せねばならない. その上で, $m = 2, n = 1$ 磁気島を消去するように, A 系統, B1 系統の電流値を定める. 今の場合, この条件 (磁気島を消去する条件) は

$$\frac{(\text{A 系統電流値}) \times 2 + (\text{B1 系統電流値})}{(\text{B2 系統電流値}) \times 2} \simeq 0.32 \tag{13}$$

となっている. この方針で LID 磁場を解析しよう. ヘリカル磁場としては, ICRF 長時間放電の際に使用した配位 (59 頁) を採用する.

「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe の GUI(8 頁参照) で次のような入力データを (fort.50) を作成する.

表 57: LID 磁場を解析するデータファイル fort.50 の例

LID 磁場を解析するデータファイル fort.50 の例
1 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 1 './lid_sampple1' ## 新規/図形化処理, cad data, cad 出力ステップ幅, 再描画間隔, 損突粒子のみ (1)/全粒子 (0), phi0, phi1, ドットサイズ (mm), 面 (0)/線 (1) ファイル名 (接辞名)

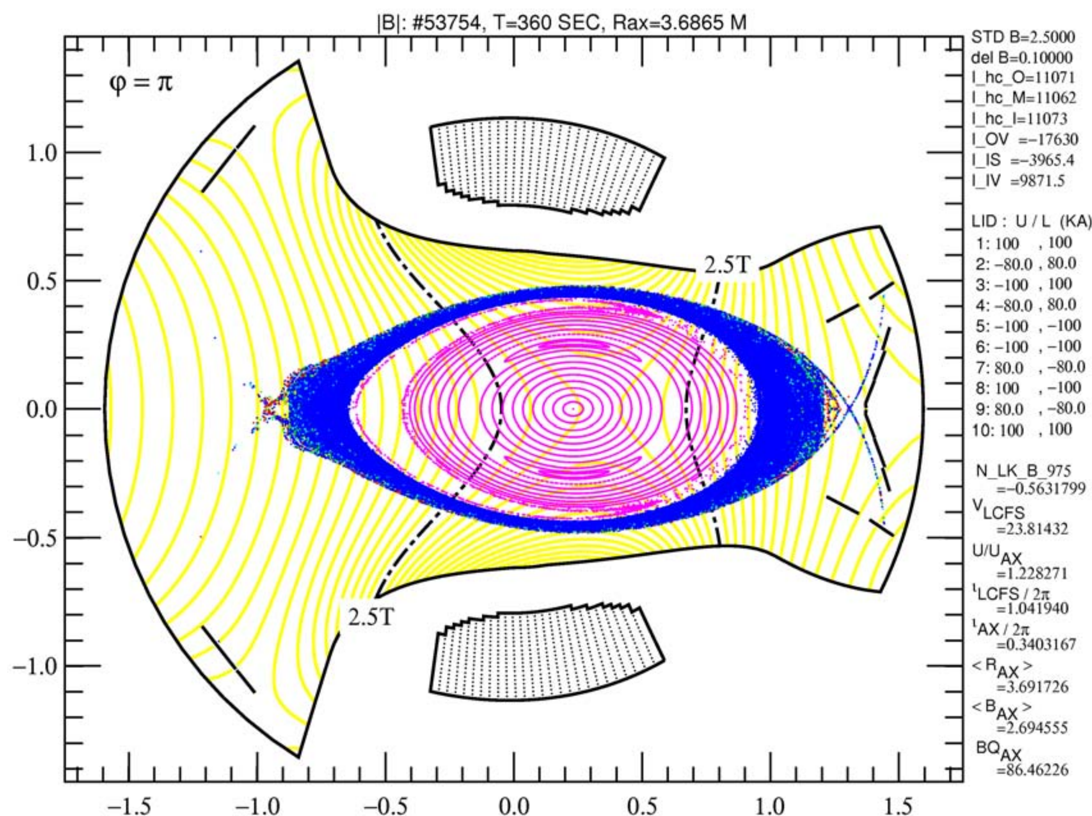


図 36: LID 磁場配位の一例. LID ヘッドを挿入する 6O ポートにおける磁力線貫通図を示す. この LID コイル電流では $m = 2, n = 1$ 磁気島が存在し, さらに, $m = 1, n = 1$ 磁気島は磁気面内部に形成されていることが示されている ($m = 1, n = 1$ 磁気島の外側に閉じた磁気面が存在する).

前ページ からの続き

LID 磁場を解析するデータファイル fort.50 の例

11071, 11062, 11073, −17630, −3965.4, 9871.5, 0.0, 100000.0, ' #53754, T=360 SEC, RAX=3.6865 M'
170000.0, −37000.0, −37000.0, −37000.0, −170000.0, −170000.0, 37000.0, 37000.0, 37000.0, 170000.0, 1
170000.0, 37000.0, 37000.0, 37000.0, −170000.0, −170000.0, −37000.0, −37000.0, −37000.0, 170000.0, 0
コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) とコメント/ lid_upper(A·T) / lid_lower(A·T) / dividing points
180.0, 4.2, 5.2, 50, 1.3
LID ヘッド位置, 最深部 r, 最浅部 r, 分割数, 図面の最大水平距離
11, 0, 1, 0.0, 0.07, 0.07, 0, 0.0, 0.0, 0.0, ''
ダイバータタイルの有無, アーマタイルの有無, ICRF アンテナの有無, 3.5UL 振り角度, 4.5UL 後退量, 7.5UL 後退量, 追加リミターの有無とデータファイル名
200, 0
最大トーラス周回数と追跡方向 (−1: $-B$ 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)
3
出発点座標系 (0:回転ヘリカル座標系, 1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)
100, 11, 37, 20, 0
径方向分割数, ポロイダル方向分割数, トロイダル方向分割数 (1 ヘリカルセクション), 磁気面枚数, カオス磁気面領域の磁気島のみプロット

前ページ からの続き

LID 磁場を解析するデータファイル fort.50 の例

```
0.5,
## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数)
0.0, 360.0, 40, 0, 0
## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 ( = 1 : 仮定する), 詳細図 (1)/通常 (0)
0, 0.1, 2.5
## 磁場強度あるいは視線と磁力線交差角分布に対する等高線図プロットの有無とそのためのデータ
0, 7.0772, 1.3691, 0.4749, 2.674, 1.9339, −1.3955, 0.0, 0.0, 0.0, 3.2
## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心. 最大視野
1, −3.17404, −4.3686, 0.0, −2.5862, −3.5596, 0.0, 0.001, 40.0, −2
## 立体図の有無と視点, 視野間中心, 視点とスクリーン位置までの距離, 視野角 (度), ドットサイズ
0, 1, 1, 1, 1, 1, 0
## 立体図に示す構造物と磁力線 (真空容器, リミター, ヘリカルコイルと容器, 垂直磁場コイル, 磁気島コイル, 磁力線)
1, 1
## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定
' LID_TEST'
### 計算結果に書き込む任意のコメント. データの終了
```

LID ヘッドを挿入する $\phi = \pi$ における磁力線貫通図は図 37 に示す.

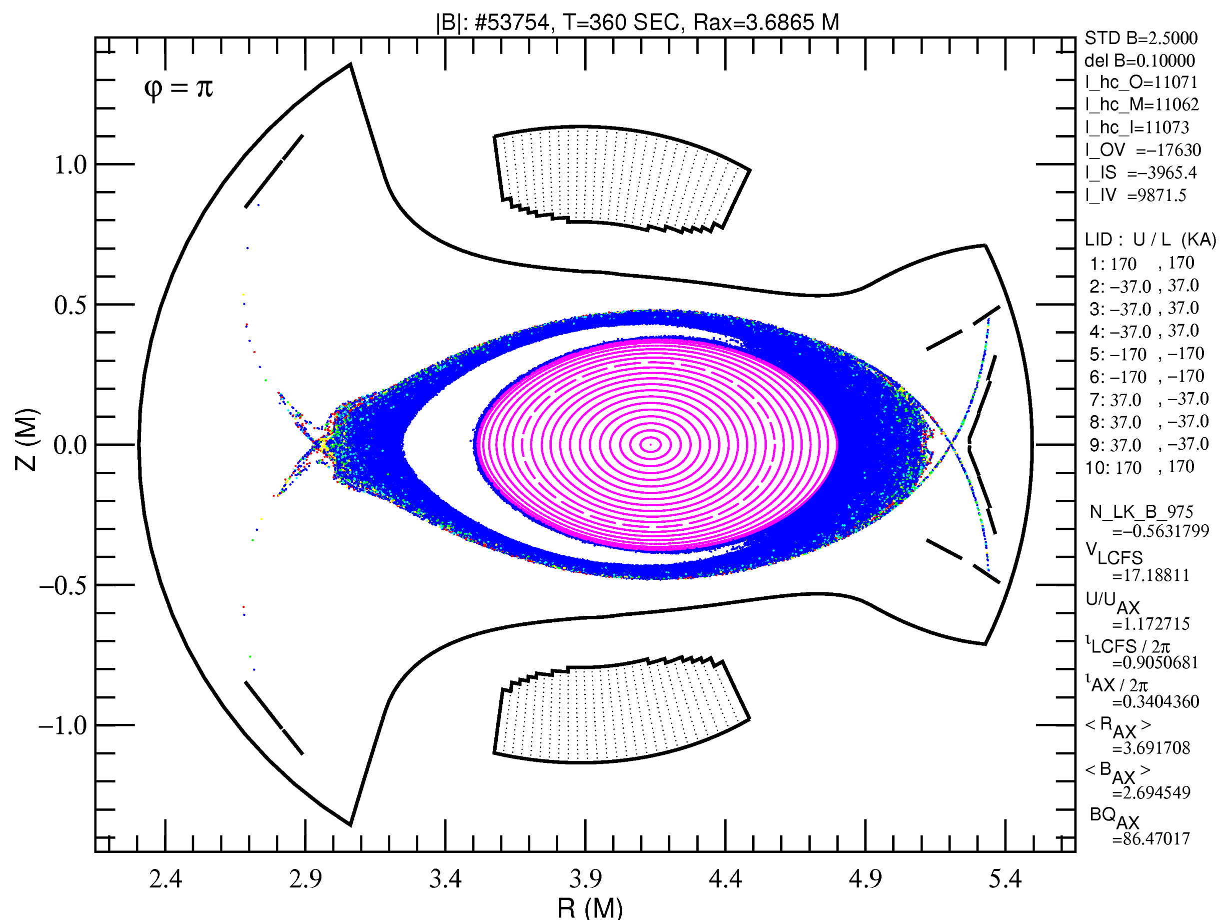


図 37: LID 磁場印加時の磁力線貫通図. LID ヘッドを挿入する子午面断面のものを示す.

最外殻磁気面に接するように十分な大きさを持つ $m = 1, n = 1$ 磁気島が形成されてい

る．さらに, $m = 2, n = 1$ 磁気島もほぼ完全に消去されているのが確認できる．ただし．$\iota/2\pi = 3/8$ の有理面に局在する微細な磁気島が存在も見える

LID 磁場印加時のダイバータチャートを図 38 に示す．LID ヘッド形状の設計, あるいは LID ヘッドへの熱負荷解析に必要となる, LID ヘッド対応磁力線貫通図を図 39, 40 に示す.

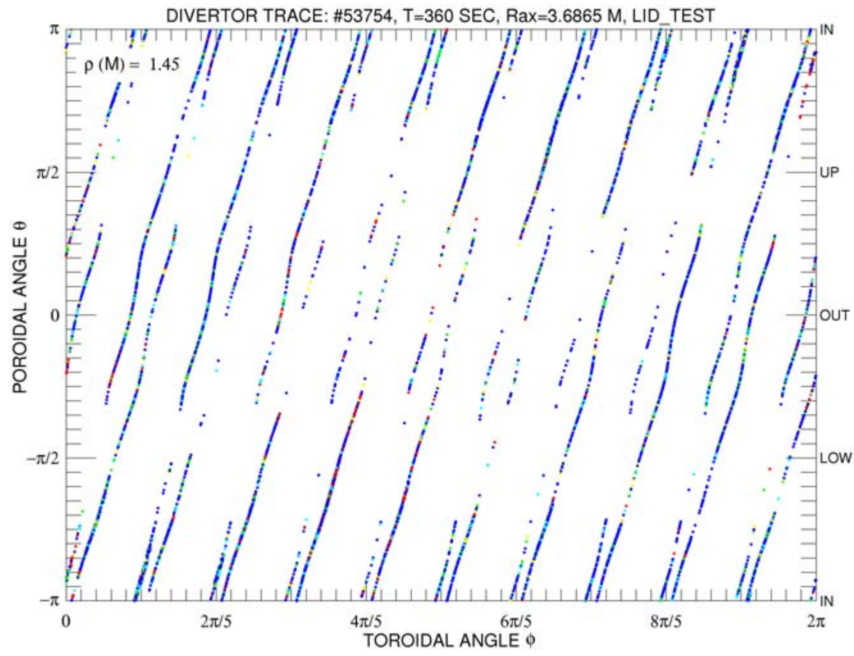


図 38: LID 磁場印加時のダイバータチャート

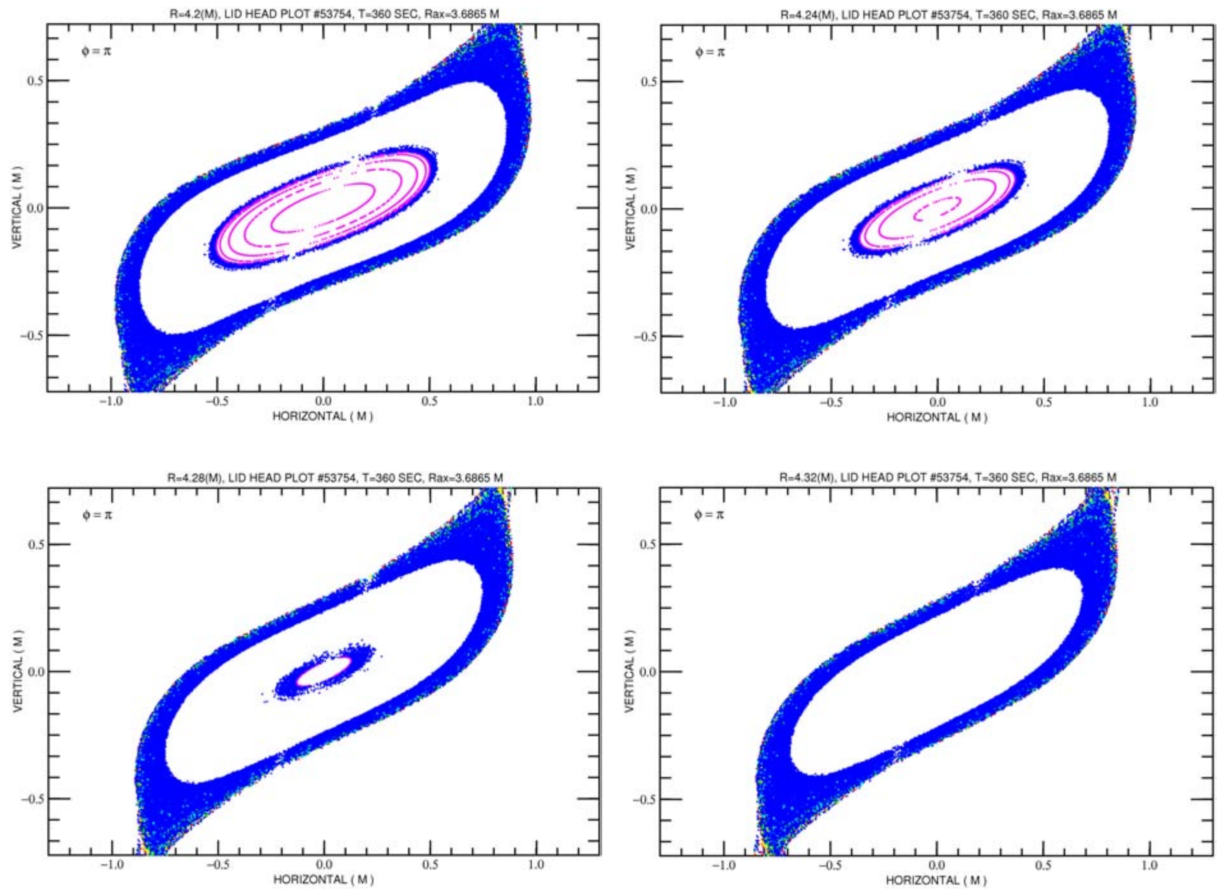


図 39: LID ヘッド対応磁力線貫通図—その 1. LID ヘッドを $r = 4.2$m からを $r = 4.32$m まで引き抜く操作に対応している

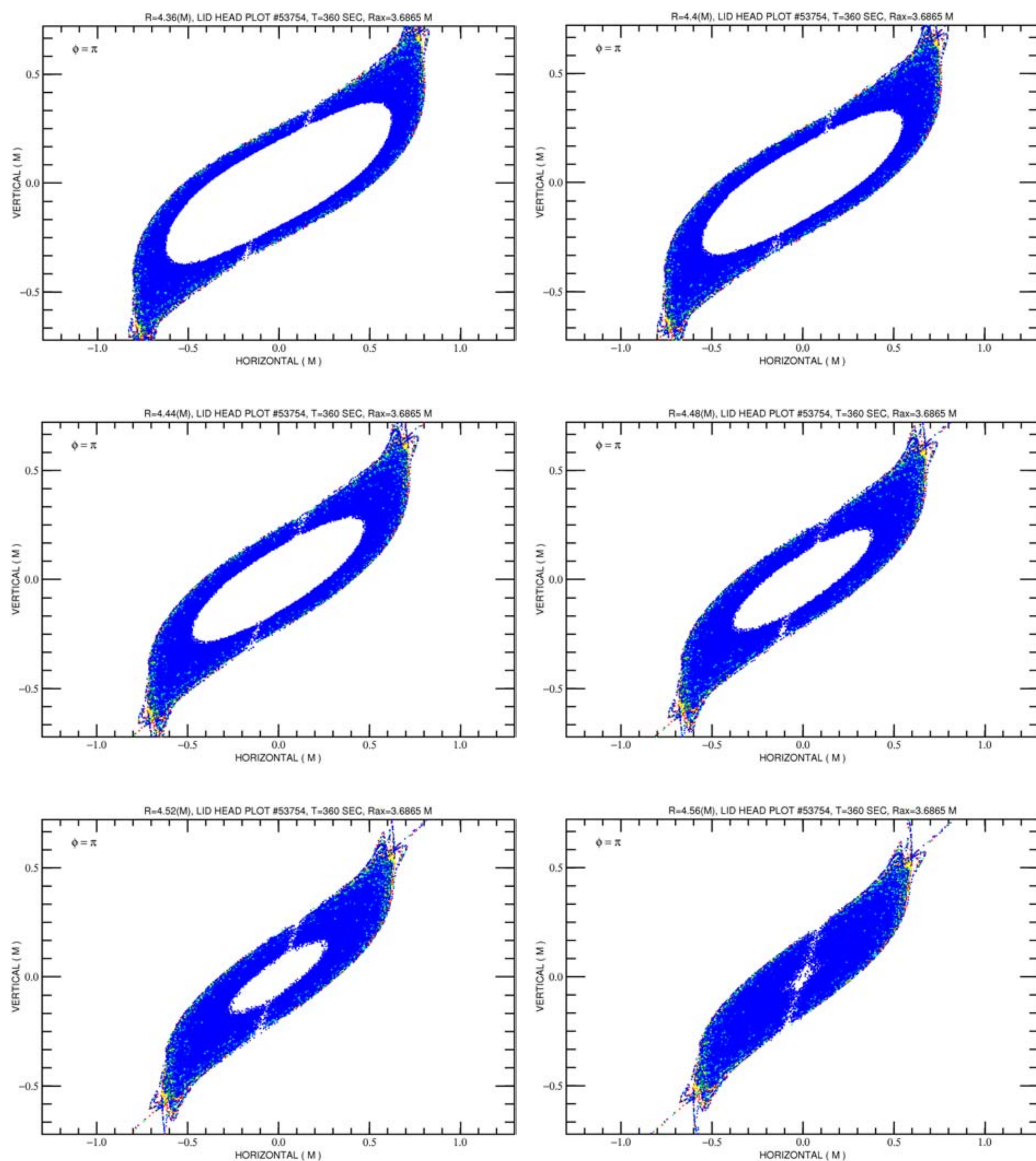


図 40: LID ヘッド対応磁力線貫通図—その 2. LID ヘッドを $r = 4.36$m からを $r = 4.56$m まで引き抜く操作に対応している

内寄せ標準磁場配位 ($R_{\rm AX} = 3.6\,{\rm m}, B_{\rm AX} = 2.75\,{\rm T}$) と標準磁場配位 ($R_{\rm AX} = 3.75\,{\rm m}, B_{\rm AX} = 2.75\,{\rm T}$) とにおける，LID 磁場の解析例を図 41,42 に示す．LID コイルの電流値には表 5 に示されているものを使う．

表 58: 内寄せ標準磁場配位での LID 磁場を解析するデータファイル fort.50 の例

内寄せ標準磁場配位での LID 磁場を解析するデータファイル fort.50 の例
1 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 1 './lid_magnetic_field_r360'
新規/図形化処理, cad data, cad 出力ステップ幅, 再描画間隔, 損突粒子のみ (1)/全粒子 (0), phi0, phi1, ドットサイズ (mm), 面 (0)/線 (1) ファイル名 (接辞名)
11000, 11000, 11000, −17967, −3007, 11229, 0.0, 100000.0, ' RAX=3.6 M, BAX=2.75 T, gamma=1.254'
92160.0, 0.0, 92160.0, 0.0, −92160.0, −92160.0, 0.0, −92160.0, 0.0, 92160.0, 1
92160.0, 0.0, −92160.0, 0.0, −92160.0, −92160.0, 0.0, 92160.0, 0.0, 92160.0, 0
コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) とコメント/ lid_upper(A turn) / lid_lower (A turn) / dividing points
180.0, 4.2, 5.2, 50, 1.3
LID ヘッド位置, 最深部 r, 最浅部 r, 分割数, 図面の最大水平距離
11, 0, 1, 0.0, 0.07, 0.07, 0, 0.0, 0.0, 0.0, ''
ダイバータタイルの有無, アーマタイルの有無, ICRF アンテナの有無, 3.5UL 振り角度，4.5UL 後退量，7.5UL 後退量，追加リミターの有無とデータファイル名
100, 0
最大トーラス周回数と追跡方向 (−1: $-B$ 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)
3
出発点座標系 (0:回転ヘリカル座標系, 1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)
50, 5, 73, 20, 0
径方向分割数, ポロイダル方向分割数, トロイダル方向分割数 (1 ヘリカルセクション), 磁気面枚数，カオス磁気面領域の磁気島のみプロット
0.5,
描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数)，磁気面領域描画の有無
0.0, 360.0, 40, 0, 0
子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 (= 1 : 仮定する), 詳細図 (1)/通常 (0)
4, 0.1, 2.5
磁場強度あるいは視線と磁力線交差角分布に対する等高線図プロットの有無とそのためのデータ
1, 7.0772, 1.3691, 0.4749, 2.674, 1.9339, −1.3955, 0.0, 0.0, 0.0, 3.2
任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心．最大視野
3, −3.17404, −4.3686, 0.0, −2.5862, −3.5596, 0.0, 0.001, 40.0, −3
立体図の有無と視点, 視野間中心，視点とスクリーン位置までの距離， 視野角 (度), ドットサイズ
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
立体図に示す構造物と磁力線 (真空容器，リミター，ヘリカルコイルと容器，垂直磁場コイル，磁気島コイル，磁力線)
1, 1
リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定
'LID magnetic field'
計算結果に書き込む任意のコメント．データの終了

内寄せ標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.6\,{\rm m}$) では, $m = 1$, $n = 1$ の磁気島は磁気面領域の内部に形成されている．それに対して, 標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$) では, $m = 1$, $n = 1$ の磁気島は最外殻磁気面にほぼ接している．

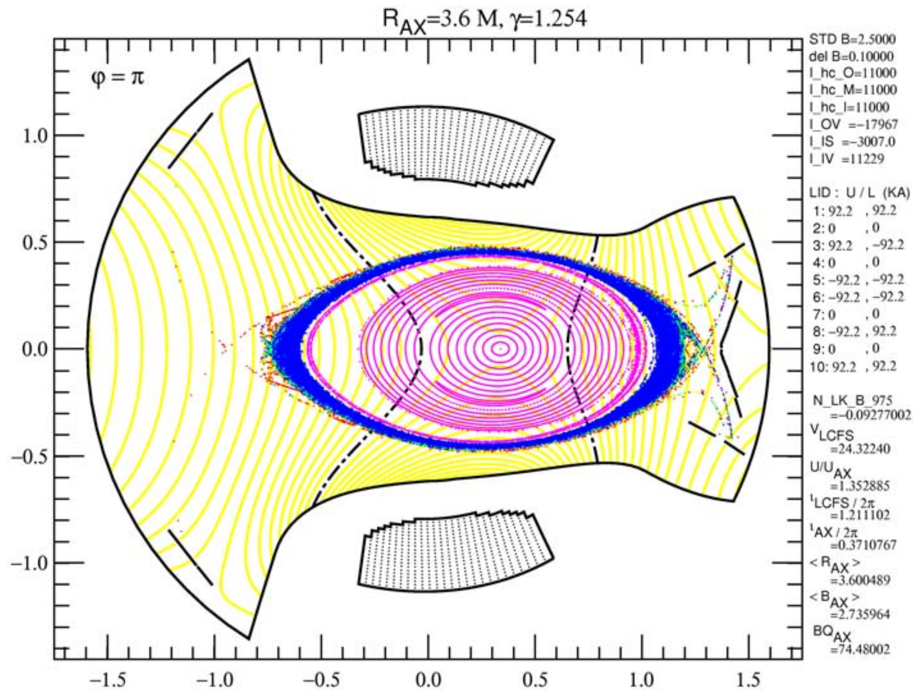


図 41: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.6\,{\rm m}$) での LID 磁場.

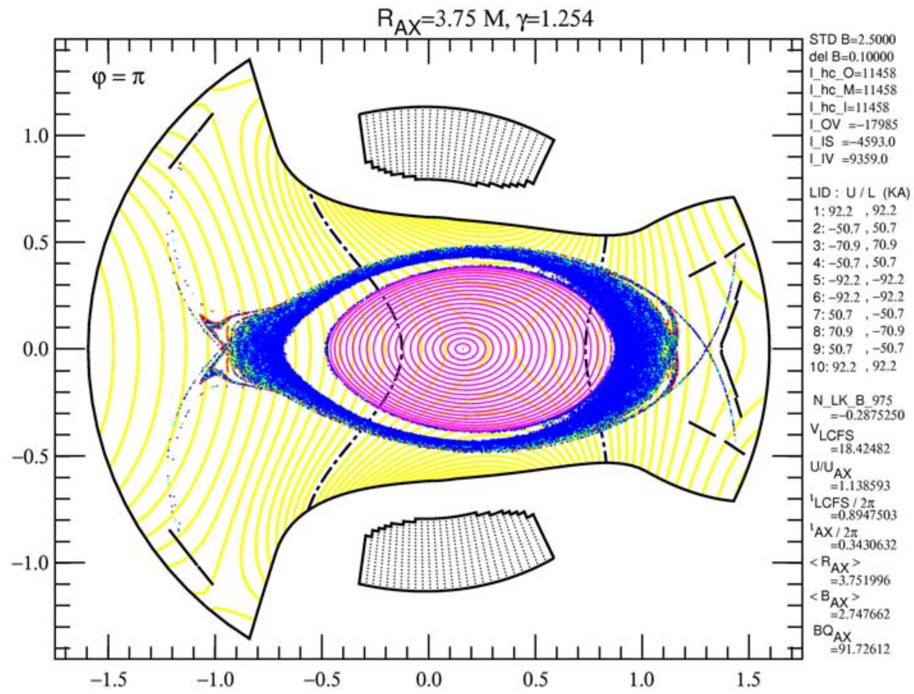


図 42: 標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$) での LID 磁場.

5.6 LID ヘッド挿入時の数値解析例

標準磁場配位 ($R_{\mathrm{AX}} = 3.75\,\mathrm{m}$, $B_{\mathrm{AX}} = 2.75\,\mathrm{T}$) における，LID 磁場の解析例を図 43 ∼ 48 に示す.

表 59: 標準磁場配位での LID 磁場を解析するデータファイル fort.50 の例

標準磁場配位での LID 磁場を解析するデータファイル fort.50 の例
1 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 1 './lid_head_r375_180_010' ## 新規/図形化処理, cad data, cad 出力ステップ幅, 再描画間隔, 損突粒子のみ (1)/全粒子 (0), phi0, phi1, ドットサイズ (mm), 面 (0)/線 (1) ファイル名 (接辞名) 11458, 11458, 11458, −17985, −4593, 9359, 0.0, 100000.0, ' Rax=3.75 M, Bax=2.75 T, gamma=1.254' 92160.0, −50688.0, −70944.0, −50688.0, −92160.0, −92160.0, 50688.0, 70944.0, 50688.0, 92160.0, 1 92160.0, 50688.0, 70944.0, 50688.0, −92160.0, −92160.0, −50688.0, −70944.0, −50688.0, 92160.0, 0 ## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) と公称値 / lid_upper(A turn) / lid_lower (A turn) / dividing points 180.0, 4.2, 5.2, 24, 1.3 ## LID ヘッド位置, 最深部 r, 最浅部 r, 分割数, 図面の最大水平距離 11, 0, 1, 0.0, 0.07, 0.07, 1, 0.0, −0.10, 0.0, '../6_O_LID_head.dat' ## ダイバータタイルの有無, アーマタイルの有無, ICRF アンテナの有無, 3.5UL 振り角度，4.5UL 後退量，7.5UL 後退量，追加リミターの有無とデータファイル名 400, 0 ## 最大トーラス周回数と追跡方向 (−1: $-B$ 方向,　0: 両方向, 1: B 方向) 3 ## 出発点記述座標系 (0:回転ヘリカル座標系，1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面) 400, 40, 7, 10, 0 ## 径方向分割数, ポロイダル方向分割数, トロイダル方向分割数 (1 ヘリカルセクション), 磁気面枚数，カオス磁気面領域の磁気島のみプロット 0.5, ## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数)，磁気面領域描画の有無 180.0, 216.0, 4, 0, 0 ## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 (= 1 : 仮定する), 詳細図 (1)/通常 (0) 4, 0.1, 2.5 ## 磁場強度あるいは視線と磁力線交差角分布に対する等高線図プロットの有無とそのためのデータ 1, 0.0, −2.9, 2.0, 0.0, −4.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 4.2 (注) ## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心．最大視野 3, 0.0, −2.9, 2.0, 0.0, −4.2, 0.0, 2.0, 25.0, 4 ## 立体図の有無と視点, 視野間中心，視点とスクリーン位置までの距離，　視野角 (度), ドットサイズ 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1 ## 立体図に示す構造物と磁力線 (真空容器，リミター，ヘリカルコイルと容器，垂直磁場コイル，磁気島コイル，磁力線) 1, 1 ## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定 'lid_head_r375_180_010' ### 計算結果に書き込む任意のコメント．　データの終了

(注) : 任意断面磁力線貫通図で，１ (ほぼ水平な平面) を指定した場合，トーラスの内側から外側を見るような座標を設定する，と天地が逆となる．(トーラスの外側から内側を見るような座標を設定する，と正立像となる).

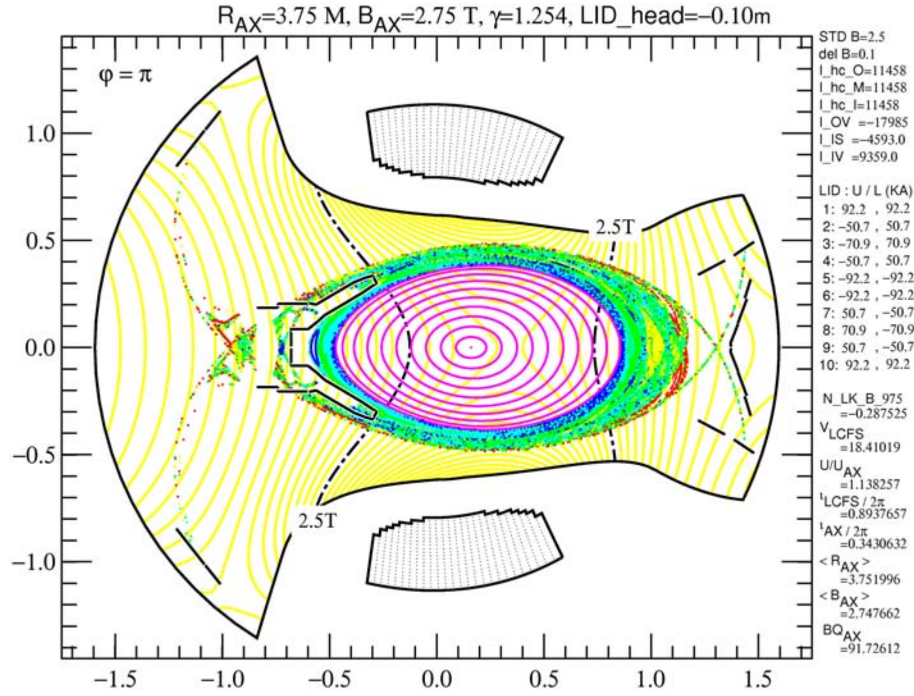


図 43: 標準磁場配位 ($R_{\mathrm{ax}} = 3.75\,\mathrm{m}$) での LID 磁場と LID ヘッド．磁気島に LID ヘッドが収まっているため，磁力線は，LID ヘッドの外側に多く当たっている．(LID ヘッドの移動量は，$-0.10m$)

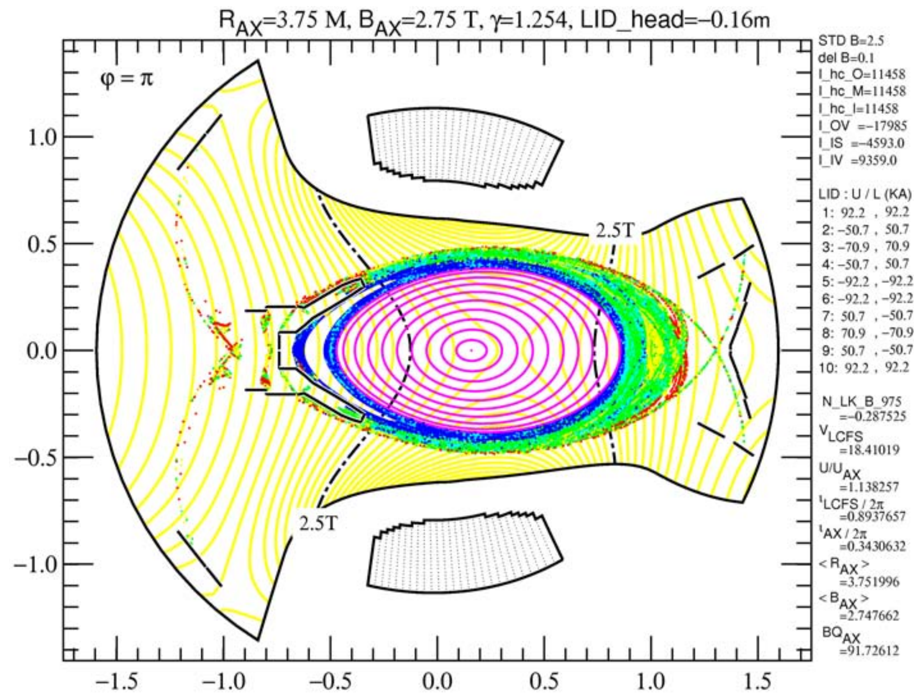


図 44: 標準磁場配位 ($R_{\mathrm{ax}} = 3.75\,\mathrm{m}$) での LID 磁場と LID ヘッド．磁気島より外に LID ヘッドがあるため，磁力線が LID ヘッドの内側に多く当たっている．(LID ヘッドの移動量は，$-0.16m$)

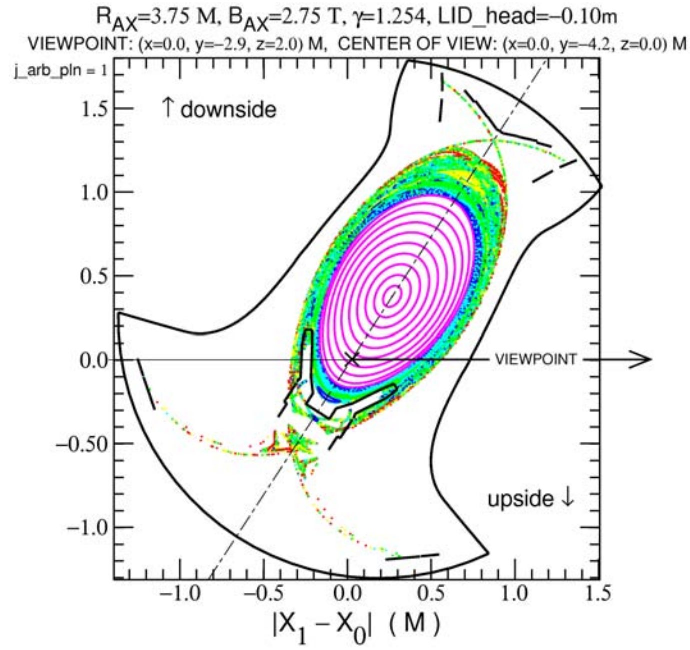


図 45: 標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$) での磁力線貫通図．磁気島に LID ヘッドが収まっているため，磁力線は，LID ヘッドの外側に多く当たっている．また，トーラスの内側から見ているため，天地が逆になっている．(LID ヘッドの移動量は，$-0.10m$)

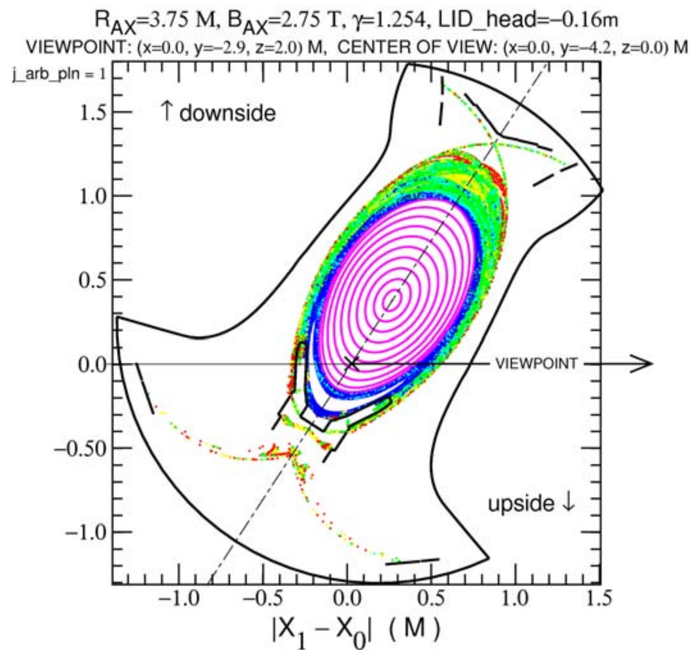


図 46: 標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.75\,{\rm m}$) での磁力線貫通図．磁気島より外に LID ヘッドがあるため，磁力線が LID ヘッドの内側に多く当たっている．また，トーラスの内側から見ているため，天地が逆になっている．(LID ヘッドの移動量は，$-0.16m$)

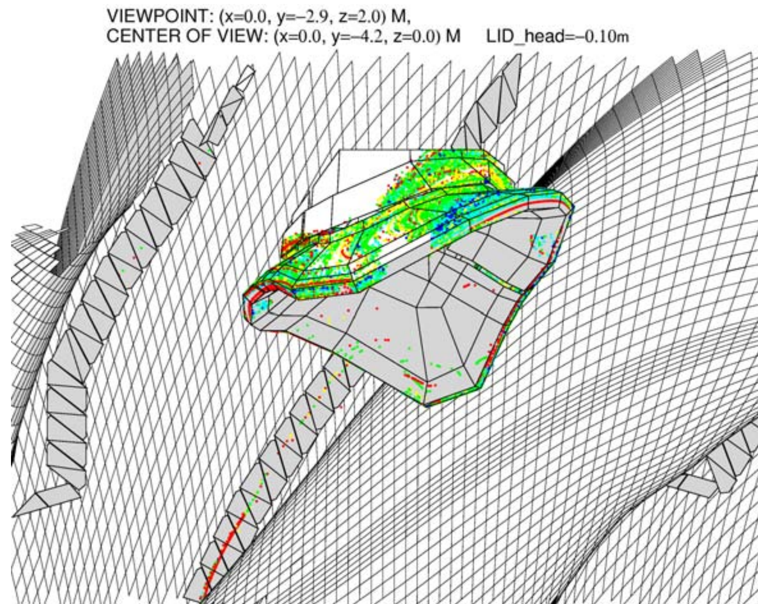


図 47: LID ヘッドに対する磁気面，カオス磁力線領域を形成している磁力線の当たり具合. 磁気島に LID ヘッドが収まっているため，磁力線は，LID ヘッドの外側に多く当たっている．(LID ヘッドの移動量は，$-0.10m$)

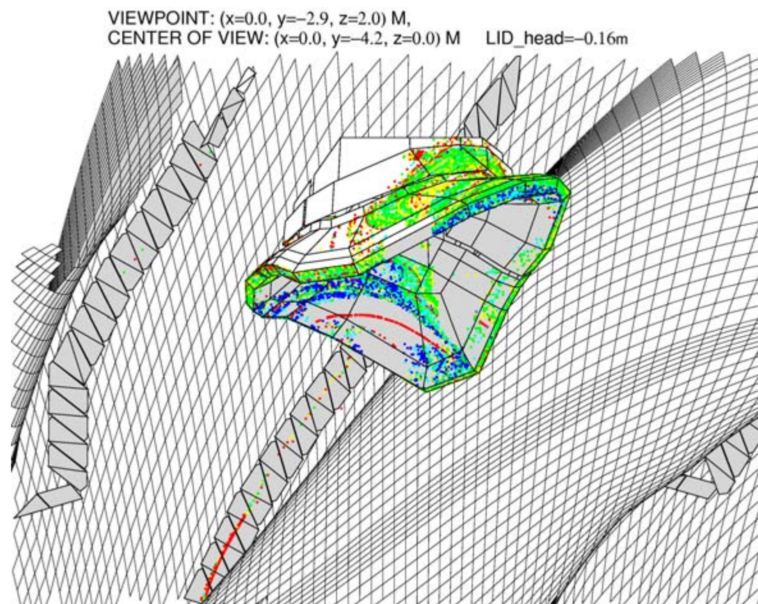


図 48: LID ヘッドに対する磁気面，カオス磁力線領域を形成している磁力線の当たり具合. 磁気島より外に LID ヘッドがあるため，磁力線が LID ヘッドの内側に多く当たっている．(LID ヘッドの移動量は，$-0.16m$)

5.7 NBI アーマータイルありの場合の数値解析例

内寄せ標準磁場配位 ($R_{\mathrm{AX}} = 3.6\,\mathrm{m}, B_{\mathrm{AX}} = 2.75\,\mathrm{T}$) における，アーマータイルありの場合の数値解析例を図 49 ∼ 51 に示す.

表 60: 内寄せ標準磁場配位でアーマータイルありの場合を解析するデータファイル fort.50 の例

内寄せ標準磁場配位でアーマータイルありの場合を解析するデータファイル fort.50 の例

```
1 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 1 './NBI3ArmorTile'
## 新規/図形化処理, cad data, cad 出力ステップ幅, 再描画間隔, 損突粒子のみ (1)/全粒子 (0), phi0, phi1, ドットサイズ (mm), 面 (0)/線 (1) ファイル名 (接辞名)
11000, 11000, 11000, −17967, −3007, 11229, 0.0, 100000.0, ' Rax=3.6 M, Bax=2.75 T, gamma=1.254'
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0
## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) と公称値 / lid_upper(A turn) / lid_lower (A turn) / dividing points
0.0, 0.0, 0.0, 0, 0.0
## LID ヘッド位置, 最深部 r, 最浅部 r, 分割数, 図面の最大水平距離
11, 1, 1, 0.0, 0.07, 0.07, 0, 0.0, 0.0, 0.0, ”
## ダイバータタイルの有無, アーマタイルの有無, ICRF アンテナの有無, 3.5UL 振り角度，4.5UL 後退量，7.5UL 後退量，追加リミターの有無とデータファイル名
20, 0
## 最大トーラス周回数と追跡方向 (−1: −B 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)
3
## 出発点記述座標系 (0:回転ヘリカル座標系，1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)
400, 40, 14, 10, 0
## 径方向分割数, ポロイダル方向分割数, トロイダル方向分割数 (1 ヘリカルセクション), 磁気面枚数，カオス磁気面領域の磁気島のみプロット
0.5,
## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数)，磁気面領域描画の有無
132.0, 144.0, 4, 1, 0
## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 ( = 1 : 仮定する), 詳細図 (1)/通常 (0)
0, 0.0, 0.0
## 磁場強度あるいは視線と磁力線交差角分布に対する等高線図プロットの有無とそのためのデータ
1, 0.0, −3.5, −0.2, 2.5, −3.6, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 3.2 (注)
## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心．最大視野
3, 0.0, −3.5, −0.2, 2.5, −3.6, 0.0, 2.4, 45.0, −4
## 立体図の有無と視点, 視野間中心，視点とスクリーン位置までの距離，視野角 (度), ドットサイズ
1, 1, 0, 0, 0, 0, 1
## 立体図に示す構造物と磁力線 (真空容器，リミター，ヘリカルコイルと容器，垂直磁場コイル，磁気島コイル，磁力線)
1, 1
## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定
'NBI3ArmorTile'
### 計算結果に書き込む任意のコメント． データの終了
```

(注) : 任意断面磁力線貫通図で，1 (ほぼ水平な平面) を指定した場合，トーラスの内側から外側を見るような座標を設定する，と天地が逆となる．(トーラスの外側から内側を見るような座標を設定する，と正立像となる).

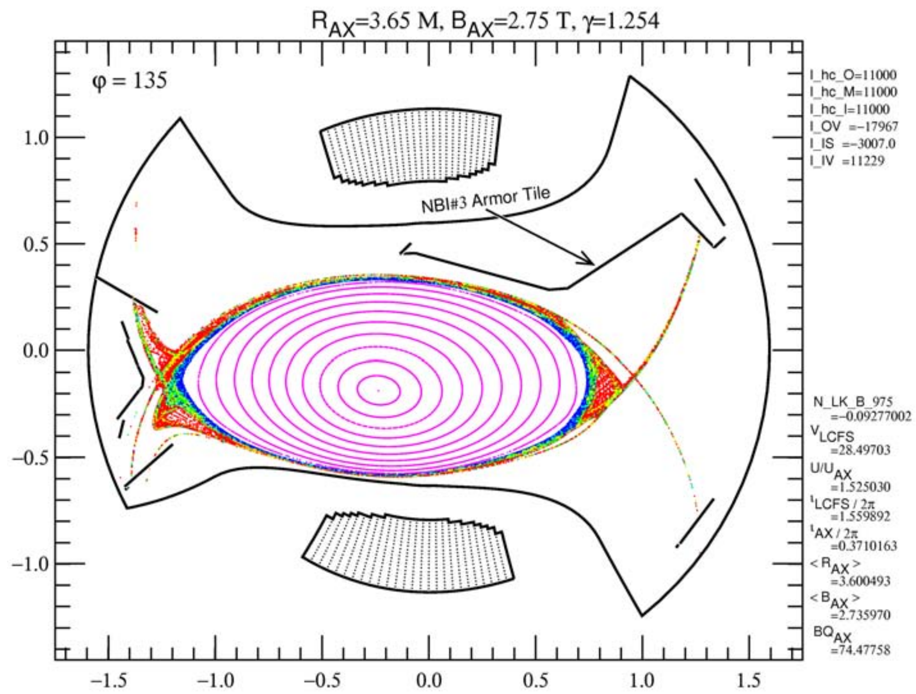


図 49: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.6\,{\rm m}$) での LID 磁場と NBI#3 アーマータイル.

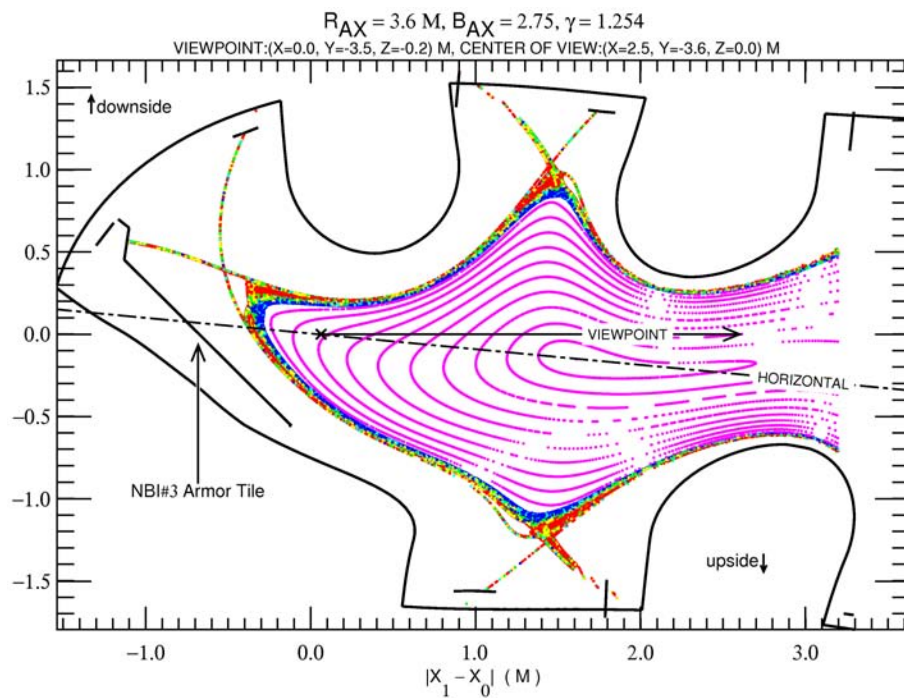


図 50: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{\rm ax} = 3.6\,{\rm m}$) での磁力線貫通図．トーラスの内側から見ているため，天地が逆になっている．

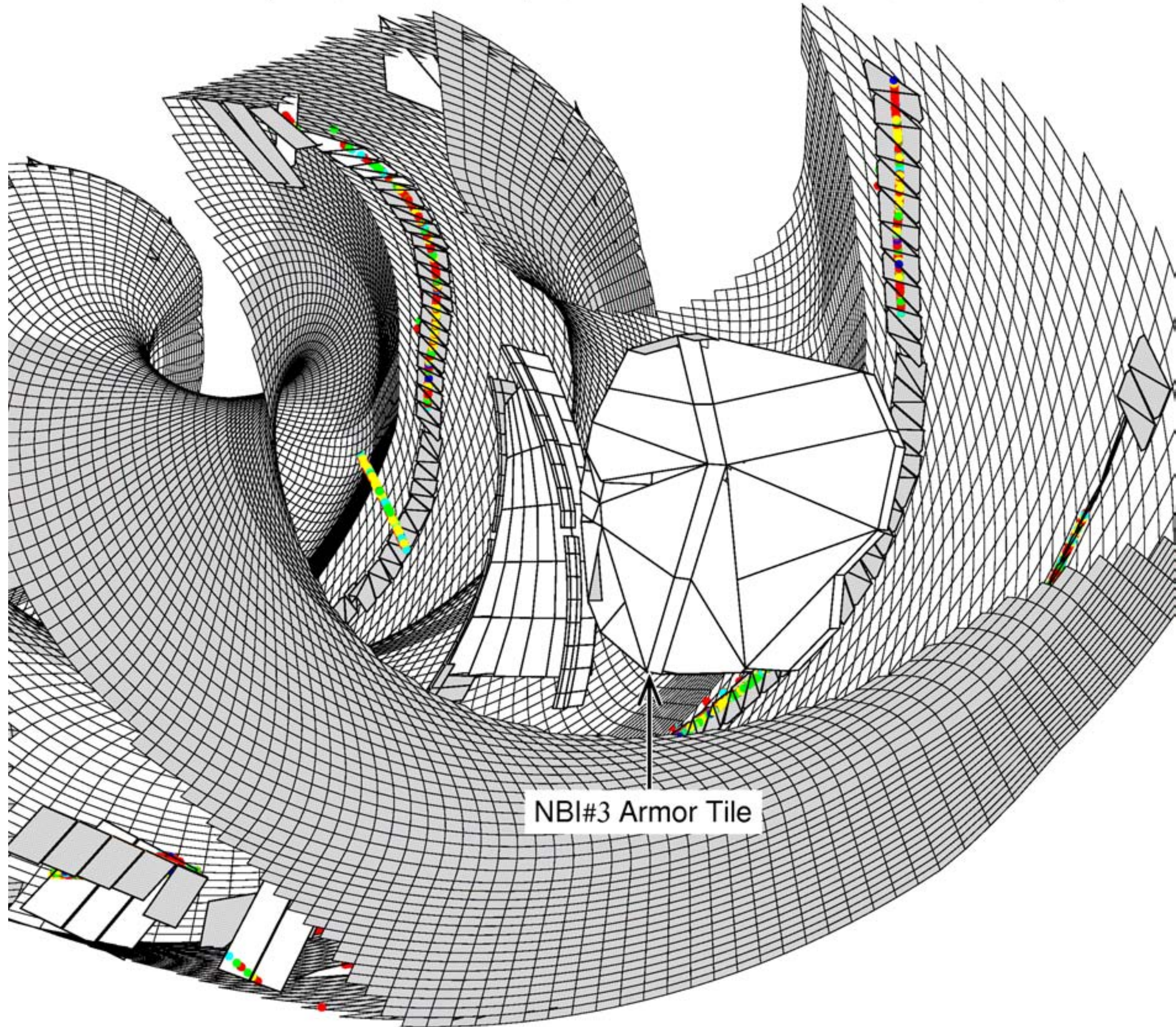


図 51: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{\mathrm{ax}} = 3.6\,\mathrm{m}$) での立体図.

5.8　DXF 出力例

内寄せ標準磁場配位 ($R_{\mathrm{AX}} = 3.6\,\mathrm{m}, B_{\mathrm{AX}} = 2.75\,\mathrm{T}$) における，18 度から 360 度までを DXF 出力する例を図 52 に示す．

表 61: 内寄せ標準磁場配位で 18 度から 360 度までを DXF 出力する場合のデータファイル fort.50 の例

内寄せ標準磁場配位で 18 度から 360 度までを DXF 出力する場合のデータファイル fort.50 の例
1 1 −300 3 0 18.0 360.0 7.0 1 '18_360Lines_of_force' (注 1) ## 新規/図形化処理, cad data, cad 出力ステップ幅, 再描画間隔, 損突粒子のみ (1)/全粒子 (0), phi0, phi1, ドットサイズ (mm), 面 (0)/線 (1) ファイル名 (接辞名) 11000, 11000, 11000, −17967, −3007, 11229, 0.0, 100000.0, 'Rax=3.6 M, Bax=2.75 T, gamma=1.254' 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0 ## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) と公称値 / lid_upper(A turn) / lid_lower (A turn) / dividing points 0.0, 0.0, 0.0, 0, 0.0 ## LID ヘッド位置, 最深部 r, 最浅部 r, 分割数, 図面の最大水平距離 11, 0, 1, 0.0, 0.07, 0.07, 0, 0.0, 0.0, 0.0, '' ## ダイバータタイルの有無, アーマタイルの有無, ICRF アンテナの有無, 3.5UL 振り角度，4.5UL 後退量，7.5UL 後退量，追加リミターの有無とデータファイル名 20, 0 ## 最大トーラス周回数と追跡方向 (−1: $-B$ 方向, 0: 両方向, 1: B 方向) 3 ## 出発点記述座標系 (0:回転ヘリカル座標系，1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面) 50, 5, 7, 10, 0 (注 2) ## 径方向分割数, ポロイダル方向分割数, トロイダル方向分割数 (1 ヘリカルセクション), 磁気面枚数，カオス磁気面領域の磁気島のみプロット 0.5, ## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数)，磁気面領域描画の有無 135.0, 180.0, 2, 1, 0 ## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 (= 1 : 仮定する), 詳細図 (1)/通常 (0) 0, 0.0, 0.0 ## 磁場強度あるいは視線と磁力線交差角分布に対する等高線図プロットの有無とそのためのデータ 1, 0.0, −3.5, −0.2, 2.5, −3.6, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 3.2 ## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心．最大視野 3, 0.0, −3.5, −0.2, 2.5, −3.6, 0.0, 2.4, 45.0, −4 ## 立体図の有無と視点, 視野間中心，視点とスクリーン位置までの距離， 視野角 (度), ドットサイズ 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1 ## 立体図に示す構造物と磁力線 (真空容器，リミター，ヘリカルコイルと容器，垂直磁場コイル，磁気島コイル，磁力線) 1, 1 ## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定 '18_360Lines_of_force' ### 計算結果に書き込む任意のコメント．　データの終了

(注 1)： 18 度から 360 度まで，最終地点から出力する場合．
(注 2)： 分割数があまり多いと出力される DXF ファイルが巨大になるため，出力範囲が広い場合は分割数を少なめに設定する．

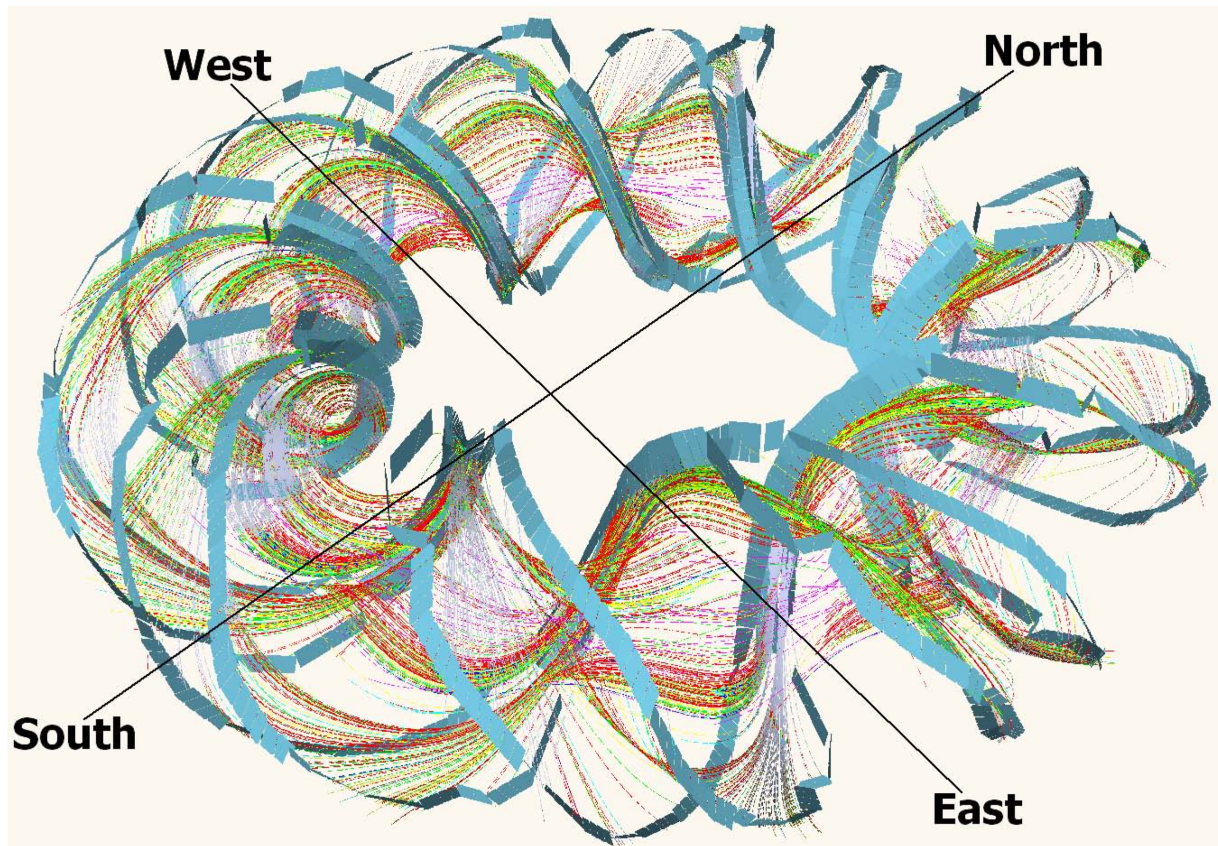


図 52: 出力されたカオス磁力線の DXF ファイルとダイバータタイルを Google SketchUP で読み込んだ例.

5.9 磁気軸位置、漏れ磁場強度を指定した磁気面解析例

磁場配位 ($R_{\rm AX}=3.90\,{\rm m}, B_{\rm AX}=2.5385\,{\rm T}$), 磁気軸位置 ($R_0 = 3.90$m), 漏れ磁場強度 (0.7G) における，磁気面解析例を図 53 に示す.

表 62: 磁気軸位置、漏れ磁場強度を指定した磁気面を解析するデータファイル fort.50 の例

磁気軸位置、漏れ磁場強度を指定した磁気面を解析するデータファイル fort.50 の例
1 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 1 'r390_icfs_1_1_sample' ## 新規/図形化処理, cad data, cad 出力ステップ幅, 再描画間隔, 損突粒子のみ (1)/全粒子 (0), phi0, phi1, ドットサイズ (mm), 面 (0)/線 (1) ファイル名 (接辞名) 11000, 11000, 11000, −16585, −5754, 6845, 3.9, 0.7, 'Rax=3.90 M, Bax=2.5385 T, gamma=1.2538' 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 50 ## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) と公称値 / lid_upper(A turn) / lid_lower (A turn) / dividing points 0.0, 0.0, 0.0, 0, 0.0 ## LID ヘッド位置, 最深部 r, 最浅部 r, 分割数, 図面の最大水平距離 11, 0, 1, 0.0, 0.07, 0.07, 0, 0.0, 0.0, 0.0, '' ## ダイバータタイルの有無, アーマタイルの有無, ICRF アンテナの有無, 3.5UL 振り角度，4.5UL 後退量，7.5UL 後退量，追加リミターの有無とデータファイル名 50, 0 ## 最大トーラス周回数と追跡方向 (−1: $-B$ 方向, 0: 両方向, 1: B 方向) 3 ## 出発点記述座標系 (0:回転ヘリカル座標系，1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面) 50, 5, 7, 10, 0 ## 径方向分割数, ポロイダル方向分割数, トロイダル方向分割数 (1 ヘリカルセクション), 磁気面枚数，カオス磁気面領域の磁気島のみプロット 0.5, ## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数)，磁気面領域描画の有無 18.0, 54.0, 36, 1, 0 ## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 (= 1 : 仮定する), 詳細図 (1)/通常 (0) 0, 0.0, 0.0 ## 磁場強度あるいは視線と磁力線交差角分布に対する等高線図プロットの有無とそのためのデータ 1, 7.0772, 1.3691, 0.4749, 2.674, 1.9339, −1.3955, 0.0, 0.0, 0.0, 3.2 ## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心．最大視野 3, 7.0772, 1.3691, 0.4749, 2.674, 1.9339, −1.3955, 2.3, 10.0, −5 ## 立体図の有無と視点, 視野間中心，視点とスクリーン位置までの距離， 視野角 (度), ドットサイズ 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1 ## 立体図に示す構造物と磁力線 (真空容器，リミター，ヘリカルコイルと容器，垂直磁場コイル，磁気島コイル，磁力線) 1, 1 ## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定 'r390_icfs_1_sample' ### 計算結果に書き込む任意のコメント． データの終了

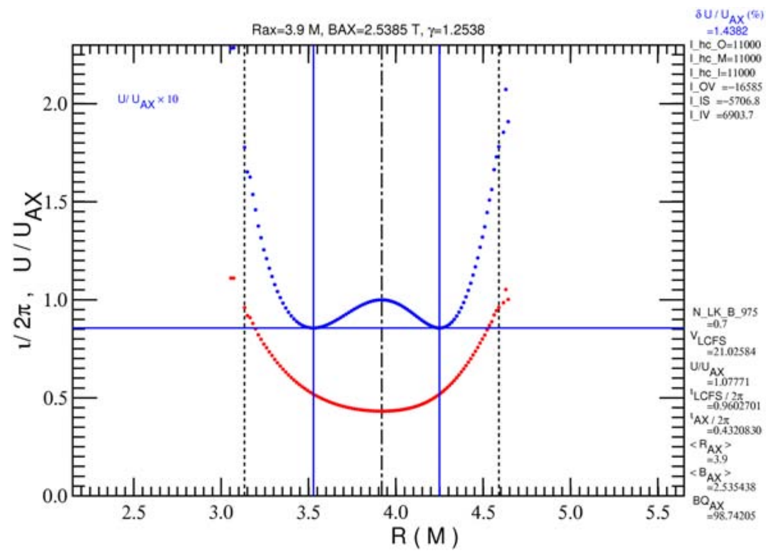


図 53: 磁力線比体積 (青ドット) と回転変換分布 (赤ドット)

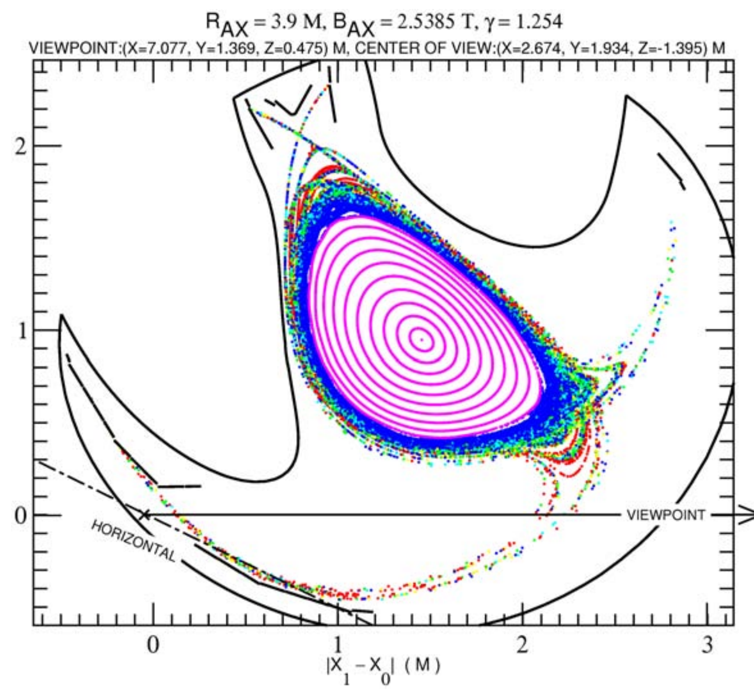


図 54: 最外殻磁気面

6　使用上の注意点とその他の覚え書き

LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」を使う上での注意点を列挙する.

- 子午面断面貫通図, 任意断面貫通図は磁力線追跡時に必要なデータを全て取得している. そのため, そのデータを再画像化するときは, 磁力線追跡計算時と同一のデータでなければばならない. (第 8 データ (39 頁), 第 10 データ (42 頁))
- 立体図は任意の条件 (第 10 データ (42) 頁) で再画像化できる (視点, 視野中心位置等を任意に設定して, 再画像化処理できる) .

LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」のソースプログラムは 4 個の fortran90 プログラムで作られている (表 63).

磁力線追跡プログラム	lhd_lines_of_force.f90
LHD 装置解析プログラム	lhdmsview.f90
図形処理プログラム	gsnifs.f90
汎用非線形方程式処理プログラム	delfmthd.f90

表 63: LHD 磁力線・磁気面可視化プログラムのソースプログラム

これらのプログラムから, LHD 磁力線･磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」を作るには次のようにする. (64 ビットパソコンの Linux オペレーティングシステム上に, Linux 版 Fortran&C Package 64 V1 (富士通) がインストールされているとする)

まず最初に適当なディレクトリー (例えば home directory) の下に 6 個のディレクトリー

LHD_lines_of_force,　lhdmsview,　gsnifs,
dvt_tile_point,　lhd_B_data,　delfmthd

を作成する. 表 63 のプログラムをそれぞれのディレクトリーにコピーする. さらに, プログラムの実行に必要なダイバータタイルデータを dvt_tile_point ディレクトリに, LHD の磁場データを lhd_B_data ディレクトリにそれぞれコピーする.

ディレクトリー LHD_lines_of_force に移動し, 12 行からなる次の Makefile を作成する. LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe—Ver.IV」では磁気面の切断面を表示するためと, 磁気面関数の最適近似関数の係数を決定するために, N 変数の非線形方程式 ($N = 3$, $N = 10$) を解かねばならない. そのため, subroutine newton_nd を利用している. subroutine newton_nd は Module delfmthd を組み立てるプログラム delfmthd.f90 に含まれている.

```
lhd_lines_of_force.exe: ../gsnifs/gsnifs.o ../delfmthd/delfmthd.o  \
      ../lhdmsview/lhdmsview.o lhd_lines_of_force.f90
      frt -Ae -Am -Kfast -o lhd_lines_of_force.exe -fw -I ../gsnifs -I ../lhdmsview  \
      -I ../delfmthd  ../gsnifs/gsnifs.o ../delfmthd/delfmthd.o \
      ../lhdmsview/lhdmsview.o lhd_lines_of_force.f90
../lhdmsview/lhdmsview.o:  ../gsnifs/gsnifs.o ../lhdmsview/lhdmsview.f90
      frt -Ae -Am -Kfast -c -o ../lhdmsview/lhdmsview.o -fw -M ../lhdmsview -I \
      ../gsnifs ../gsnifs/gsnifs.o ../lhdmsview/lhdmsview.f90
../gsnifs/gsnifs.o:  ../gsnifs/gsnifs.f90
      frt -Ae -Am -Kfast -c -o ../gsnifs/gsnifs.o -fw -M ../gsnifs  ../gsnifs/gsnifs.f90
../delfmthd/delfmthd.o: ../delfmthd/delfmthd.f90
      frt -Ae -Am -Kfast -c -o ../delfmthd/delfmthd.o -M ../delfmthd ../delfmthd/delfmthd.f90
```

ディレクトリー LHD_lines_of_force 上で

make　Enter-key

とすれば, LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」が作成される.

7 謝辞

LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」の完成までには核融合科学研究所の多数の方々から多くの援助・励ましをいただきました

LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」開発の一番の原動力は，LHD 実験結果と LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」の計算結果との対応に深い関心を寄せていただいたことにあります．LHD 実験グループの方々に深く感謝いたします.

LHD 装置に関するデータは下記の方々から提供していただきました．このことに，心からのお礼を申しあげます.

LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」の特色は LHD の真空容器の形状が正確に取り入れられていることである．プログラムに真空容器形状を取り入れるために，必要かつ十分な設計図は小森彰夫教授に提供していただきました.

LHD の真空容器壁には，第 3 サイクル以降は，保護板が取り付けられている．LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」にこの保護板は組み込まれていなかった.
NBI 粒子と真空容器との干渉をより一層精密に判定できることをめざし, LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe—Ver.III」以降では，2.5 cm 厚の保護板を真空容器壁に貼り付け，その表面を LHD 真空容器の境界と設定した.　すなわち，LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe—Ver.III」以降では, それ以前の計算結果に比べれば真空容器壁は 2.5 cm だけ狭まっている.

LHD 磁場の計算に不可欠な，ヘリカルコイル，垂直磁場コイルのデータは，佐藤隆教授，今川信作教授から提供していただきました．佐藤隆教授からは，装置大半径 $r_0 = 3.9$m は LHD 実験遂行時 (真空容器冷却時) の数値であるが，設計図にあるその他の数値は全て常温時のものであるとの注意を受けました．これに従い，LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」に組み込まれている磁場コイル，真空容器のデータは設計図の数値に，0.997 倍されたものが使用されています．これらのコイルの作る磁場のテーブルは赤尾英毅博士に作成していただきました．LID 磁場コイルのデータは大藪修義教授に提供していただきました．

ICRF アンテナの形状は武藤敬教授に提供していただきました．また，ICRF アンテナのサイドリミター，NBI アーマータイルのデータは装置技術課の飯間理史氏，米津宏昭氏，小島治樹氏に提供していただきました．

第 4 節の実行例に使用した CCD カメラ位置のデータは庄司圭助手，芦川直子助手にデータを提供していただきました．第 4.4 節の実行例 (Zeeman 効果を用いた LHD 周辺部の中性原子密度計測に対応する計算例) では，後藤基志助手にデータを提供していただきました．LID コイルのターン数，LID 磁場については，森崎友宏助教授に詳しく教えていただきました．

真空容器の正確な形状が LHD プラズマの MHD 安定性の観点から必要となることは市口勝治助教授からご指摘を受けました．それに従い, 48 頁の図 4.10.1) に必要データを追加しました. また, 総合研究大学院大学物理科学研究科核融合科学専攻の小川博紀氏から,「真空容器壁, ダイバータタイルの走査」(67,79 頁) 画像が鏡映像となっていると指摘を受け, 修正することができました.

参考文献

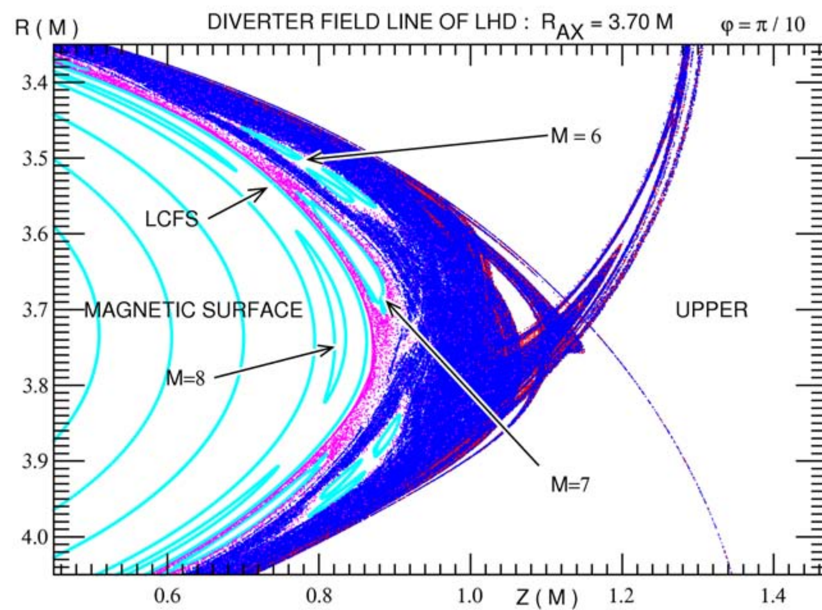
[1] 渡辺二太, 赤尾英毅, 「ヘリカルプラズマに成立する対称性」, J. Plasma Fusion Res. **73** （1997) pp.186 - 200 .

[2] AKAO, H., "Numerical Study of Whisker Field Lines in the Periphery of the Large Helical Device", J. Phys. Soc. JPN, **59** (1990) p.1633.

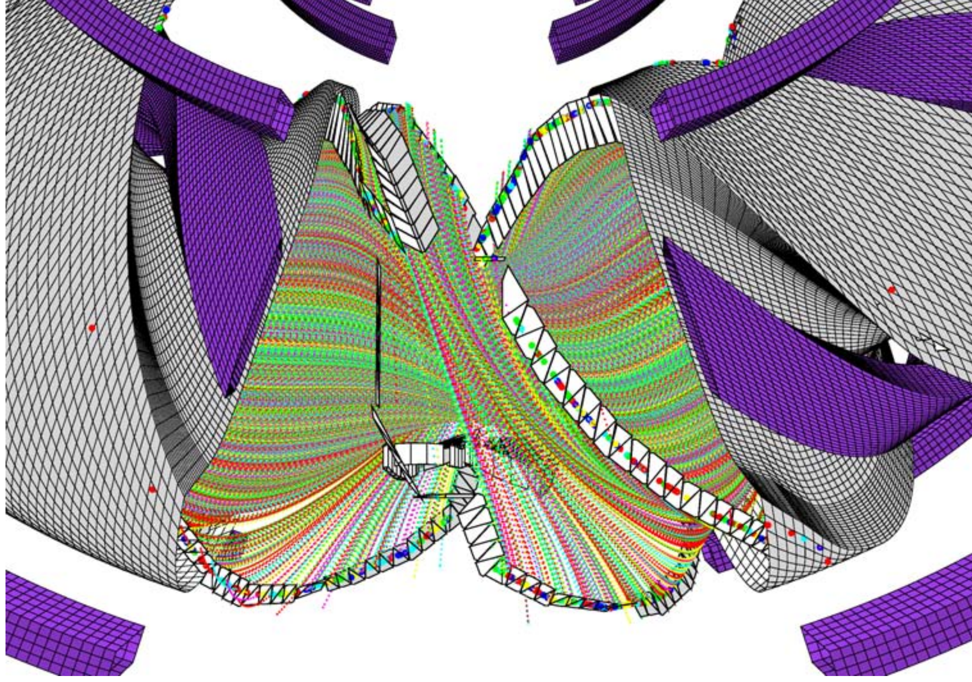
[3] T.Watanabe, Y. Matsumoto, M. Hishiki, S. Oikawa, H. Hojo, M. Shoji, S. Masuzaki, R. Kumazawa, K. Saito, T. Seki, T. Mutoh, A. Komori and LHD Experimental Group, "Magnetic field structure and confinement of energetic particles in the LHD", Nucl. Fusion **46** (2006) 291 — 305.

[4] 渡辺二太, 吉田正信, 増崎 貴, 江本雅彦, 長山好夫,
Tsuguhiro Watanabe, Masanobu Yoshida, Suguru Masuzaki, Masahiko Emoto, and Yoshio Nagayama
LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム — LHD_lines_of_force.exe — の使い方
How to Use the Numerical System "LHD_LINES_OF_FORCE.EXE" for the Visualization of Lines of Force in the Large Helical Device.

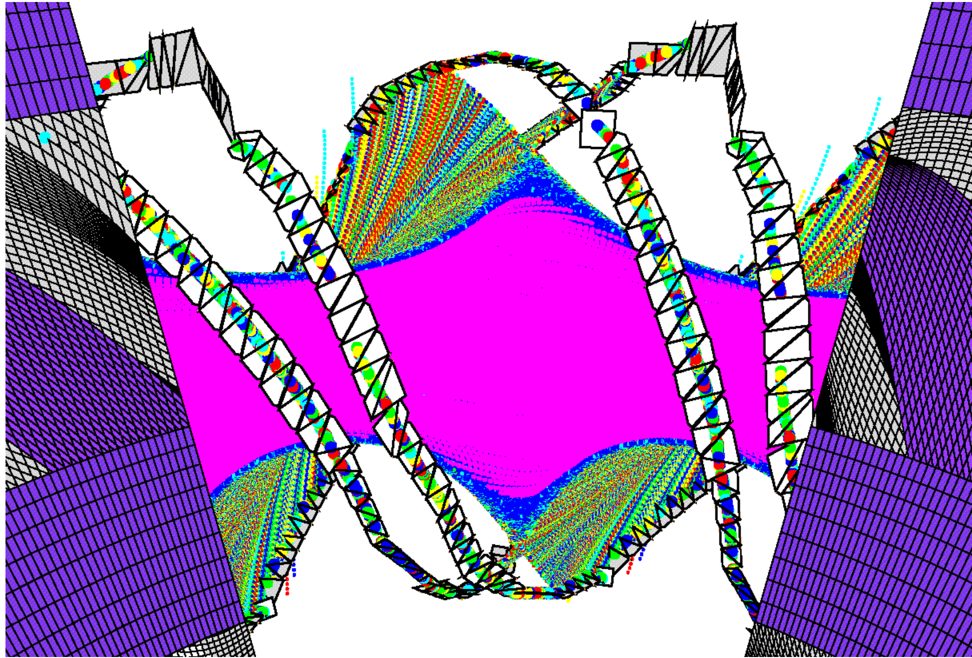
(Reasearch Report NIFS-TECH Series-14, National Institute for Fusion Science, Toki, Japan)



図の説明: LHD における磁気面, 最外殻磁気面 (LCFS), 磁気島, カオス磁力線, ダイバータレッグの詳細. 子午面 ($\phi = \pi/10$) における磁力線貫通図を示す. 磁気軸位置は $R_{\rm ax} = 3.7$m である. 磁気軸位置を $R_{\rm ax} = 3.66$m に設定すると, $m = 7$, $n = 1$ 磁気島は, カオス磁力線領域に移動し, $m = 5$, $n = 1$ の大きな磁気島が発生する. (3 頁参照)



LHD における高性能プラズマ保持を実現しているカオス磁力線の立体構造. 真空容器壁を $\pi/10 \leq \phi \leq 4\pi/10$ の範囲で切除してしている. ダイバータタイルも示されている. トーラス外側から見る.



真空容器壁を $\pi/10 \leq \phi \leq 4\pi/10$ の範囲で切除している. LHD の磁力線立体構造を磁気軸 $(r = r_{\rm ax})$ を通り, 法線が視点 $(r = r_{\rm eye},\, z = z_{\rm eye})$ に向かう, 曲面

$$(r - r_{\rm ax})(r_{\rm eye} - r_{\rm ax}) + z\, z_{\rm eye} = 0$$

で切断して, 磁気面領域 (鮮紅色プロット) とカオス磁力線の立体構造を示す. ダイバータタイルも示されている. トーラス内側から見る.